



Daniel Filipe Lourenço Lavrador
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Estudo de avaliação de emissões de nanopartículas na soldadura por fricção linear de ligas de alumínio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
(UNL/FCT,DEMI)
Co-orientador: Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes
(IPL/ISEL,ADEQ)

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Vogais: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2012

Copyright

Estudo de avaliação de emissões de nanopartículas na soldadura por fricção linear de ligas de alumínio

©Daniel Filipe Lourenço Lavrador, FCT-UNL, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho apenas foi possível, com a colaboração de várias pessoas e instituições, às quais dirijo os meus mais sinceros agradecimentos.

À minha orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, os meus mais sinceros agradecimentos, pelo apoio e disponibilidade constantes ao longo deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor João Gomes, agradeço igualmente a ajuda prestada e o acompanhamento em vários domínios desta dissertação.

À Professora Doutora Teresa Vieira e à Eng^a Rita Santos da Universidade de Coimbra, agradeço, por todo o apoio e disponibilidade para a realização deste trabalho, nomeadamente na análise granulométrica e análise microscópica das partículas recolhidas.

À Professora Doutora Patrícia Carvalho do Microlab IST, agradeço pela disponibilidade e ajuda prestada na análise TEM e de EDS.

Ao Professor Doutor Telmo Santos e ao Eng. João Gonzalez o meu agradecimento pela ajuda prestada na realização da soldadura por fricção linear na primeira fase de ensaios.

Ao Eng. João Gandra, e ao colega João Prior por toda a disponibilidade, ajuda, e paciência na realização da soldadura na segunda fase de ensaios.

A todos os membros da secção de Tecnologia Mecânica do DEMI, professores, técnicos e colegas, pelas sugestões, apoio e companheirismo demonstrado ao longo de todo este trabalho.

À minha família, nomeadamente à minha Mãe e Irmã, agradeço por tudo, ao longo de todos estes anos.

Ao meu colega Carlos Guerreiro por toda a ajuda prestada ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos pelo companheirismo e paciência ao longo de todo este período, nomeadamente à Débora Azeitona pela ajuda prestada.

Agradeço também às seguintes instituições:

Ao Instituto Superior Técnico

À Universidade de Coimbra

Ao Microlab, Electron Microscopy Laboratory (ICEM/IST).

RESUMO

No processo de soldadura por fricção linear (SFL), o conhecimento em relação à libertação de nanopartículas é, ainda, reduzido. O processo tem sido considerado como limpo, ou seja, sem emissões de fumos. Contudo, estudos recentes apontam para a existência de partículas com dimensões inferiores a 100 nm. As nanopartículas têm uma elevada capacidade de deposição alveolar, provocando assim uma diminuição da capacidade respiratória dos indivíduos.

Este estudo tem como objectivos a determinação das áreas superficiais de nanopartículas depositadas na região alveolar do pulmão, níveis de emissão, morfologia e composição, resultantes de diversos parâmetros operacionais, assim como avaliar a necessidade de propor formas para a minimização de emissões de nanopartículas neste processo.

A SFL foi realizada nas ligas de alumínio, AA 5083 e AA 6082, com velocidades de rotação diferentes, sendo efectuadas medições para determinar a área superficial das partículas depositadas na zona alveolar, a sua granulometria, e caracterizar as nanopartículas em microscopia electrónica.

Os resultados confirmam a existência de emissões de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar e a existência de relações entre os parâmetros de soldadura e a área de deposição no pulmão. Concluiu-se também que a sua composição química está directamente relacionada com os materiais utilizados no processo.

PALAVRAS-CHAVE

Nanopartículas

Soldadura por fricção linear (SFL)

Ligas de Alumínio

Deposição alveolar

Emissões

ABSTRACT

Limited knowledge exists on nanoparticles emitted in Friction Stir Welding (FSW). The process is considered as a clean process, without fume emissions. However, recent studies have shown the existence of particles with dimensions inferior to 100 nm. The nanoparticles have a high deposition capacity in the alveoli causing a decrease in the respiratory capability of individuals.

This study aims to determine of surface area of nanoparticles deposited in the alveolar region of the human lung, its emission levels, morphology, and chemical composition, resulting from various operational parameters, and assesses also the need of proposing measurements to minimize the emissions of nanoparticles.

FSW was done in two different aluminum alloys, AA 5083 and AA 6082, with two different rotation speeds, and measurements were made to determine the surface area of nanoparticles deposited in the alveolar region, size distribution. Particles were also sampled for transmission electron microscopy analysis.

Results confirmed the existence of emissions of nanoparticles with alveolar deposition capability, and the existence of relationships between the welding parameters and the deposited area in the lungs. It was shown that its chemical composition is directly connected with the nature of materials used in the process.

KEY-WORDS

Nanoparticles

Friction Stir Welding (FSW)

Aluminum alloys

Alveolar deposition

Emissions

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
PALAVRAS-CHAVE.....	iii
ABSTRACT	v
KEY-WORDS	v
ÍNDICE	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
NOMENCLATURA	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivos	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 Soldadura por fricção linear	6
2.2.1 Geometria da ferramenta.....	7
2.2.2 Parâmetros de soldadura.....	11
2.3 Emissões de nanopartículas na soldadura	14
2.4 Nanopartículas na saúde.....	17
2.5 Técnicas para a recolha e análise de nanopartículas	21
2.6 Emissões de partículas na soldadura por fricção linear.....	23
2.7 Conclusão.....	26
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	27
3.1 Introdução	27
3.2 Equipamentos de soldadura.....	28
3.2.1 Fresadora Convencional.....	28
3.2.2 Equipamento de Soldadura por fricção linear	28
3.3 Equipamentos para recolha, medição e análise de nanopartículas	29
3.3.1 <i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i>	30
3.3.2 <i>Nanometer Aerosol Sampler</i>	31
3.3.3 <i>Scanning Mobility Particle Sizer</i>	33

3.3.4	Microscópios electrónicos de transmissão	34
3.4	Caracterização de materiais.....	35
3.5	Parâmetros de Soldadura.....	37
3.5.1	Primeira fase de ensaios	37
3.5.2	Segunda fase de ensaios	37
3.6	Ferramenta de soldadura por fricção linear	38
3.7	Instalação experimental.....	39
3.7.1	Primeira fase de ensaios	39
3.7.2	Segunda fase de ensaios	40
3.8	Conclusão.....	43
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
4.1	Introdução	45
4.2	Primeira fase de ensaios	46
4.2.1	Liga AA 5083-O.....	46
4.2.2	Liga AA 6082-T6.....	50
4.2.3	Comparação entre diferentes ligas de alumínio.....	54
4.3	Segunda fase de ensaios	55
4.3.1	Resultados de deposição alveolar.....	58
4.3.2	Resultados de granulometria	63
4.3.3	Resultados de microscopia	66
5.	CONCLUSÕES.....	73
	BIBLIOGRAFIA.....	77
	ANEXOS.....	i
A1	- Valores das medições da primeira fase de ensaios para a liga AA 6082-T6	iii
A2	- Valores das medições da primeira fase de ensaios para a liga AA 5083-O	vii
A3	- Gráficos NSAM referentes à liga AA6082-T6, com ensaios, réplicas e linha base.....	xi
A3	- Gráficos NSAM referentes à liga AA5083-O, com ensaios, réplicas e linha base	xii

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Fumos de soldadura e efeitos na saúde [11, 12]	15
Tabela 2.2: Principais elementos de ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear e alguns dos seus efeitos na saúde.[12]	16
Tabela 2.3: Processos e potenciais fontes de emissão de nanopartículas.[13]	17
Tabela 2.4: Recomendações preliminares para a recolha e análise de dados.....	21
Tabela 2.5: Recomendações preliminares para relatar os resultados de microscopia electrónica	22
Tabela 2.6: Recomendações preliminares sobre a informação essencial a fornecer	23
Tabela 3.1: Especificações técnicas LEGIO™ FSW 3U [17].....	28
Tabela 3.2: Composição das ligas AA 5083 e AA 6082 [23, 24]	36
Tabela 3.3: Composição química do aço H13 AISI [25]	36
Tabela 3.4: Parâmetros de soldadura da primeira fase de ensaios	37
Tabela 3.5: Parâmetros de soldadura da segunda fase de ensaios.....	38
Tabela 4.1: Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar para a liga AA5083	50
Tabela 4.2: Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar para a liga AA 6082	54
Tabela 4.3: Valores médios medidos no ponto referente à ferramenta para diferentes ligas e velocidades	55
Tabela 4.4: Valores médios para as diferentes ligas e velocidades.....	62
Tabela 4.5: Relação entre casos e amostras medidas através do SMPS 3034.....	63
Tabela A 1: Ferramenta 1120 rev/min	iii
Tabela A 2: Ferramenta 450 rev/min	iv
Tabela A 3: Zona respiratória 1120 rev/min	v
Tabela A 4: Zona respiratória 450 rev/min	v
Tabela A 5: Envolvente 1120 rev/min	vi
Tabela A 6: Envolvente 450 rev/min	vi
Tabela A 7: Ferramenta 1120 rev/min	vii
Tabela A 8: Ferramenta 450 rev/min	viii
Tabela A 9: Zona respiratória 1120 rev/min	ix
Tabela A 10: Zona respiratória 450 rev/min	ix
Tabela A 11: Envolvente 1120 rev/min	x
Tabela A 12: Envolvente 450 rev/min	x

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Funcionamento da soldadura por fricção linear (adaptada) [1]	7
Figura 2.2: Ferramenta MX <i>Triflute</i> TM (adaptada) [1]	8
Figura 2.3: Ferramenta <i>Whorl</i> TM (adaptada) [1].....	8
Figura 2.4: Exemplos de ferramentas <i>Flared-Triflute</i> TM	9
Figura 2.5: Ferramenta <i>A-skew</i> TM (adaptada) [8]	10
Figura 2.6: Exemplo de várias geometrias de <i>shoulders</i> (adaptada) [1]	10
Figura 2.7: Variação da temperatura máxima de soldadura com a distância á soldadura com e sem utilização de pino na liga AA6061-T6 com 400 rev/min e 120 mm/min (adaptada) [1].....	11
Figura 2.8: Relação entre a velocidade de rotação e a temperatura máxima atingida na soldadura na liga AA 6083 (adaptada) [9].....	12
Figura 2.9: Efeitos da velocidade de rotação na temperatura máxima em função da distância ao centro da soldadura para a liga AA 6061Al-T6 (adaptada) [1]	13
Figura 2.10: Efeitos da variação da relação V/Ω na temperatura máxima atingida na SFL das ligas AA 2024, AA 5083, e AA 2024 (adaptada) [1].....	14
Figura 2.11: Modelo das diversas regiões do pulmão humano.[15].....	19
Figura 2.12: Curvas de eficiência de deposição na região traqueobrônquial e alveolar do pulmão (adaptada) [15]	20
Figura 3.1: Equipamento LEGIO TM FSW 3U [17]	29
Figura 3.2: NSAM 3550, monitor de área de superfície de nanopartículas [18].....	30
Figura 3.3: Esquema de funcionamento do NSAM [18].....	31
Figura 3.4: <i>Nanometer Aerosol Sampler Model</i> 3089 [19]	32
Figura 3.5: Esquema de funcionamento do NAS [19]	32
Figura 3.6: SMPS 3034 [20]	33
Figura 3.7: Microscópio electrónico de transmissão Hitachi H-8100 II	34
Figura 3.8: Microscópio electrónico de transmissão FEI-Tecnai, modelo G2 S20 [21]	35
Figura 3.9: Ferramenta SFL a) pino e <i>shoulder</i> ; b) <i>shoulder</i>	38
Figura 3.10: Esquema de posicionamento dos pontos de recolha e medição (sem escala)	40
Figura 3.11: Esquema de posicionamento dos pontos de recolha e medição (sem escala)	41
Figura 3.12: Fixação da grelha de cobre	41
Figura 3.13: Fixação NAS na segunda fase de ensaios	42
Figura 4.1: Medição para todos os pontos a 450 rev/min	47
Figura 4.2: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 450 rev/min ...	47
Figura 4.3: Medição para todos os pontos a 1120 rev/min	48
Figura 4.4: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 1120 rev/min .	48
Figura 4.5: Medição na ferramenta para 450 rev/min e 1120 rev/min	49
Figura 4.6: Medição para todos os pontos a 450 rev/min	51
Figura 4.7: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 450 rev/min ...	51
Figura 4.8: Medição para todos os pontos a 1120 rev/min	52
Figura 4.9: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 1120 rev/min .	52
Figura 4.10: Medições na ferramenta para 450 rev/min e 1120 rev/min	53
Figura 4.11: Medições na ferramenta a 450 rev/min para ambas as ligas.....	54
Figura 4.12: Medições na ferramenta a 1120 rev/min para ambas as ligas.....	55
Figura 4.13: Parâmetros de soldadura reais para a liga AA 5083, a) Caso 1 e b) Caso 2	57
Figura 4.14: Parâmetros de soldadura reais para a liga AA 6082, a) Caso 3 e b) Caso 4	58

Figura 4.15: Medições NSAM para AA 5083 a 450 rev/min	59
Figura 4.16: Medições NSAM para AA 5083 a 1120 rev/min	59
Figura 4.17: Medições NSAM para AA 6082 a 800 rev/min	60
Figura 4.18: Medições NSAM para AA 6082 a 1120 rev/min	60
Figura 4.19: Comparação entre as medições na liga AA 5083 para ambas as velocidades de rotação	61
Figura 4.20: Comparação entre as medições na liga AA 6082 para ambas as velocidades de rotação	61
Figura 4.21: Comparação entre as medições à velocidade de rotação de 1120 rev/min para as duas ligas	62
Figura 4.22: Medições do SMPS 3034 ao longo de todos os ensaios.	63
Figura 4.23: SMPS 3034 AA 5083 450 rev/min	64
Figura 4.24: SMPS 3034 AA 5083 1120 rev/min	64
Figura 4.25: SMPS 3034 AA 6082 800 rev/min	65
Figura 4.26: SMPS 3034 AA 6082 1120 rev/min	65
Figura 4.27: Partículas provenientes da soldadura na liga AA 5083, com a) escala de 200 μm e b) 500 nm	66
Figura 4.28: Partículas provenientes da soldadura na liga AA 5083, com uma escala de a) 1 μm e b) 500 nm analisadas quimicamente	68
Figura 4.29: Espectro referente às partículas representadas na figura 4.28a)	68
Figura 4.30: Espectro referente às partículas representadas na figura 4.28 b)	69
Figura 4.31: Partículas provenientes da soldadura na liga AA 5083, com a) escala de 100 nm e b) 100 nm	70
Figura 4.32: Partículas provenientes da soldadura na liga AA6082, com uma escala de a) 1 nm e b) 100 nm	71
Figura A 1: Ferramenta 1120 rev/min	xi
Figura A 2: BZ 1120 rev/min	xi
Figura A 3: Envolvente 1120 rev/min	xi
Figura A 4: Ferramenta 450 rev/min	xi
Figura A 5: Zona respiratória 450 rev/min	xi
Figura A 6: Envolvente 450 rev/min	xi
Figura A 7: Ferramenta 1120 rev/min	xii
Figura A 8: BZ 1120 rev/min	xii
Figura A 9: Envolvente 1120 rev/min	xii
Figura A 10: Ferramenta 450 rev/min	xii
Figura A 11: Zona respiratória 450 rev/min	xii
Figura A 12: Envolvente 450 rev/min	xii

NOMENCLATURA

A	Alveolar
AA	<i>Aluminium Alloy</i> (Liga de alumínio)
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i> (Conferência de Higienistas Industriais Governamentais Americanos)
AFM	<i>Atomic force microscopy</i> (Microscopia de força atômica)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
CEMUC	Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra
CPC	<i>Condensation Particle Counter</i> (Contador de partículas por condensação)
d	Diâmetro da partícula (μm)
Db(A)	Decibéis filtrados para avaliar os riscos auditivos
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DMA	<i>Differential Mobility Size Analyzer</i> (Analisador de tamanhos por mobilidade diferencial)
EDS	<i>Energy-dispersive spectroscopy</i> (Espectrometria de dispersão de energia)
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FSW	<i>Friction stir welding</i> (Soldadura por fricção linear)
HEPA	<i>High-Efficiency Particulate Air</i> (Alta eficiência em relação a partículas)
I	Fracção de partículas inaláveis
ICRP	<i>International Commission of Radiological Protection</i> (Comissão Internacional de Protecção Radiológica)
ICEM	Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais
IST	Instituto Superior Técnico
NAS	Nanometer Aerosol Sampler (Amostrador de aerossóis nanométricos)
NSAM	<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i> (Monitor de área de superfície de nanopartículas)
SFL	Soldadura por Fricção Linear

SMPS	<i>Scanning Mobility Particle Sizer</i> (Analisador do tamanho de partículas por mobilidade)
TB	Traqueobronquial
TEM	<i>Transmission electron microscopy</i> (Microscopia electrónica de transmissão)
TM	<i>Trademark</i> (Marca registada)
TSI	<i>TSI - Trust Science Innovation, Inc.</i>
TWI	<i>The Welding Institute</i> (Instituto de Soldadura do Reino Unido)
UNL	Universidade Nova de Lisboa
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (Agência Federal Americana de Protecção Ambiental)
V	Velocidade de avanço
Ω	Velocidade de rotação

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A soldadura por fricção linear (SFL) é considerada como um dos avanços mais importantes nas tecnologias de ligação de materiais desde a última metade do século XX. A SFL foi desenvolvida e patenteada pelo *The Welding Institute (TWI)* no Reino Unido em 1991 tendo sido inicialmente aplicada para a soldadura de ligas de alumínio semelhantes ou dissimilares [1]. Esta tecnologia tem sido aplicada também para soldar outros tipos de material base, incluindo cobre, magnésio, chumbo, zinco e titânio. É um processo maioritariamente usado para soldaduras topo a topo e enquadra-se na categoria de processos no estado sólido, uma vez que cria um cordão de soldadura sem fundir os dois materiais a ligar. É também considerada uma soldadura amiga do ambiente devido à sua elevada eficiência energética, respeito pelo ambiente e menor poluição quando comparada com os processos de soldadura por fusão.

A soldadura por fricção linear origina um movimento complexo do material e elevada deformação plástica. A geometria da ferramenta e o tipo de junta a soldar apresentam um papel preponderante no fluxo do material e na distribuição da temperatura, afectando a microestrutura da junta de soldadura. Apesar de ser considerado um processo “a frio”, este apresenta elevado interesse no estudo das emissões de nanopartículas.

Apesar da escassez de estudos que documentem a emissão de nanopartículas pela soldadura por fricção linear, a libertação de nanopartículas pode acontecer devido à natureza do processo, nomeadamente devido à fricção entre os materiais a soldar e a ferramenta, a temperatura atingida e a movimentação do material durante a soldadura, pelo que será importante variar os diferentes parâmetros do processo, que originam estes fenómenos para os procurar relacionar.

1.2 Motivação

Como referido anteriormente, a escassez de estudos que avaliam as emissões de nanopartículas na soldadura por fricção linear é uma lacuna na caracterização de um processo que tem sido unanimemente caracterizado como sendo um processo limpo e sem perigos para a saúde dos operadores. Tal facto está ainda longe de ser completamente avaliado. O presente estudo pretende avaliar as emissões decorrentes do processo de SFL de modo a permitir um avanço nas técnicas de recolha de nanopartículas em ambiente laboratorial, e posteriormente, aplicá-las num ambiente industrial.

Dos estudos já realizados foi possível determinar a massa de nanopartículas, a sua concentração e obter correlações para inferir da sua capacidade de deposição nos pulmões [2]. No entanto, estudos posteriores têm demonstrado que a concentração e a massa das nanopartículas podem não ter correlação directa com os seus efeitos na saúde. De acordo com estes estudos a área superficial das nanopartículas depositadas no pulmão humano é a característica mais relevante no impacto da saúde dos indivíduos. É a área de superfície das partículas que vai condicionar onde estas se vão depositar sendo que, das possíveis regiões de deposição no organismo, as que mais interesse suscitam são no nariz (cabeça), devido à possibilidade de transferência de nanopartículas para o cérebro, a região traqueobrônquial e a região alveolar devido à incapacidade de remoção dessas partículas e também devido à possibilidade transferência para o sistema circulatório acabando assim por serem transportadas para vários órgãos. Os custos avultados associados aos problemas de saúde que as nanopartículas provocam nos operadores são uma das razões que justificam a pertinência da realização deste estudo [3, 4].

1.3 Objectivos

A presente dissertação tem como objectivos a análise das emissões de nanopartículas libertadas durante o processo de soldadura por fricção linear em ligas de alumínio e a determinação da área superficial alveolar de nanopartículas depositadas no pulmão dos operadores.

Visa ainda caracterizar as partículas em função da sua dimensão, morfologia, composição e correlacionar estas emissões com as condições operatórias de soldadura utilizadas.

1.4 Estrutura da dissertação

De modo a facilitar a consulta do presente trabalho e a compreensão dos resultados obtidos, o trabalho inicia-se com um capítulo teórico, que aborda as temáticas discutidas e apresenta o estado de arte. Segue-se o plano experimental, onde se descrevem os materiais e os parâmetros adoptados para a realização das soldaduras, bem como os equipamentos e procedimentos utilizados. Por fim apresenta-se a análise e a discussão dos resultados obtidos e as conclusões extraídas.

Assim a presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos:

Capítulo 1: Apresentação da motivação, enquadramento do tema, objectivos e estrutura da dissertação, introduzindo-se o assunto em estudo e as variáveis em análise.

Capítulo 2: Descrição do processo e dos parâmetros operatórios, bem como uma análise dos trabalhos realizados e técnicas utilizadas noutros estudos para a avaliação de emissões de nanopartículas.

Capítulo 3: Descrição e caracterização dos materiais e equipamentos de soldadura utilizados e metodologias e técnicas de recolha e avaliação de nanopartículas, realizando-se também uma descrição dos equipamentos utilizados.

Capítulo 4: Apresentação dos resultados obtidos sob a forma de gráficos e tabelas, efectuando-se uma análise e discussão dos mesmos, relacionando-os com os parâmetros operatórios usados.

Capítulo 5: Apresentação das principais conclusões obtidas com este trabalho e perspetivação de futuros desenvolvimentos que se considerem importantes para aprofundar o conhecimento sobre o assunto em estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

No presente capítulo efectua-se uma revisão do estado de arte na área de investigação em foco. Deste modo para a compreensão dos factores passíveis de gerar emissões de nanopartículas na soldadura por fricção linear é imperativa a compreensão do processo e dos fenómenos que o caracterizam, bem como dos parâmetros e seus efeitos no processo. É também importante avaliar os estudos já existentes referentes às emissões de nanopartículas em soldadura, de modo a enquadrar o presente estudo e avaliar as melhores técnicas a utilizar. Devido à existência de várias técnicas e metodologias para a avaliação de emissões de nanopartículas, é indispensável efectuar uma revisão das mesmas de modo a adoptar a metodologia mais correcta.

2.2 Soldadura por fricção linear

A soldadura por fricção linear foi desenvolvida e patenteada pelo *The Welding Institute* no Reino Unido em 1991 sendo inicialmente aplicada à soldadura de ligas de alumínio. Este processo tem sido aplicado também para soldar outros tipos de materiais base incluindo o cobre, o magnésio, o chumbo, o zinco e o titânio. É um processo maioritariamente usado para soldaduras topo a topo [1].

O processo consiste numa ferramenta rotativa não consumível constituída por um pino e um *shoulder*, os quais podem apresentar variadas geometrias. De uma forma mais simplificada, pode ser descrito como sendo um pino em rotação inserido nas arestas adjacentes dos materiais base a unir, até que a superfície do *shoulder* entre em contacto com a superfície livre dos materiais a unir. Este processo origina um aumento localizado de calor que permite a mistura entre os materiais base. A ferramenta avança ao longo da linha da interface dos materiais base efectuando a soldadura por fricção linear como se pode observar na figura 2.1. Os materiais a soldar necessitam estar suportados por uma placa de apoio, que resista à força vertical aplicada e à temperatura resultante do processo, sem ocorrer deformação. Os materiais necessitam também de ser fixados através de grampos ou um sistema similar de fixação, de modo a garantir o seu posicionamento durante a soldadura [1, 5].

A ferramenta de soldadura por fricção linear tem como funções o aquecimento do material a soldar, o qual é obtido através da fricção entre a ferramenta e os materiais a unir, e a mistura dos materiais. Devido à fricção e a este aumento de temperatura localizado na região adjacente ao pino o material base plastifica. Através da rotação e translação da ferramenta ocorre o movimento do material de base, da frente para a parte posterior do pino, originando o cordão de soldadura. Durante todo o processo, o material atinge temperaturas na ordem dos 80 % da temperatura de fusão, justificando a sua designação de soldadura no estado sólido. É também importante referir que as temperaturas mais elevadas são atingidas no topo da área soldada, ou seja na interface entre o material e o *shoulder*, o que poderá ser um factor que propicia a geração de emissões de nanopartículas neste tipo de soldadura. O cordão resultante apresenta uma estrutura de grão fino sem óxidos ou porosidades [1, 5, 6]. Este processo permite a execução de juntas topo a topo e de juntas sobrepostas em materiais de baixo ponto de fusão, sem material de adição. A SFL tem sido principalmente utilizada para soldar ligas de alumínio e permite soldar chapas de espessuras desde 1 mm até várias dezenas de milímetros. As principais aplicações desta tecnologia são as indústrias aeroespacial, naval e automóvel, nomeadamente para a realização de juntas de grande comprimento [6].

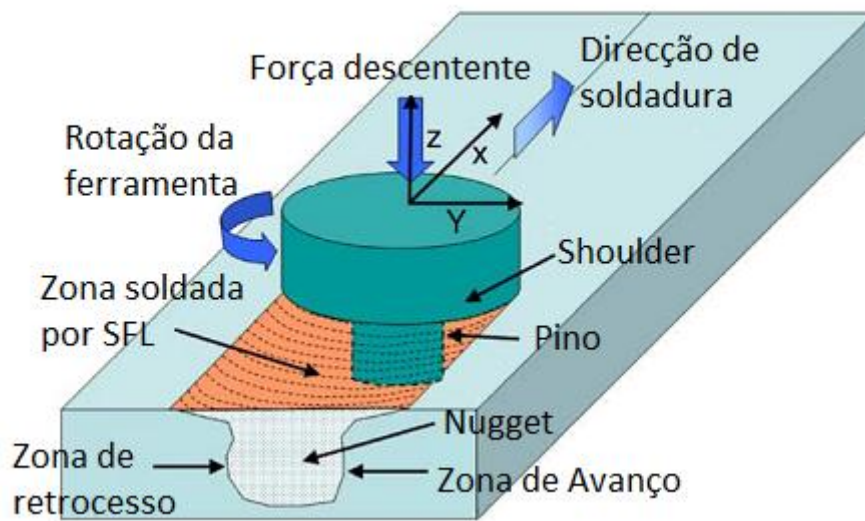


Figura 2.1: Funcionamento da soldadura por fricção linear (adaptada) [1]

A soldadura por fricção linear é um processo baseado na fricção, como tal é relevante analisar em detalhe os factores que a originam: a geometria da ferramenta, e os parâmetros de soldadura.

2.2.1 Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta é o parâmetro que mais influência o fluxo de material e desempenha um papel muito importante na velocidade avanço de soldadura a utilizar. Na etapa inicial da introdução do pino, o aquecimento do material resulta da fricção deste com o material base. Ao longo do processo, o pino tem uma contribuição reduzida para a geração do calor comparativamente com o *shoulder*. Sob o ponto de vista do calor gerado, o tamanho relativo entre o pino e o *shoulder* é preponderante.

Inicialmente foram adoptados *shoulders* côncavos e pinos estriados [1]. Estas geometrias favorecem a mistura do material e o aumento das temperaturas atingidas, o que pode conduzir a um aumento de emissões de nanopartículas. Posteriormente, para reduzir os custos energéticos associados ao processo, e de modo a obter melhores soldaduras, foram desenvolvidas várias geometrias.

Devido ao facto de as geometrias representarem uma importância elevada na microestrutura da soldadura, nas suas propriedades, e nos parâmetros a usar, têm sido desenvolvidas várias geometrias de modo a optimizar os resultados obtidos. Contudo, tais desenvolvimentos só foram possíveis através da experiência e dos avanços na compreensão do fluxo de material base [7].

As geometrias mais recentes são geometrias complexas e têm sido desenvolvidas para alterar o fluxo de material, a mistura entre os materiais e reduzir os esforços necessários para obter uma soldadura de qualidade. Na figura 2.2 pode observar-se a ferramenta MX *Triflute*TM e na figura 2.3 a ferramenta *Whorl*TM, desenvolvidas pelo TWI. Estas ferramentas têm volumes inferiores de pino em relação aos pinos cilíndricos similares. No caso da *Whorl*TM a rosca cônica produz uma velocidade vertical que facilita o fluxo plástico do material. A ferramenta MX *Triflute*TM, para além de roscada, apresenta três ranhuras verticais que aumentam a superfície de contacto entre ferramenta e o material, originando um aumento na geração de calor, tornando assim mais fácil a plastificação do material. Aumenta ainda o fluxo de material, o que origina reduções, tanto na força de avanço, como de rotação da ferramenta [1, 7].

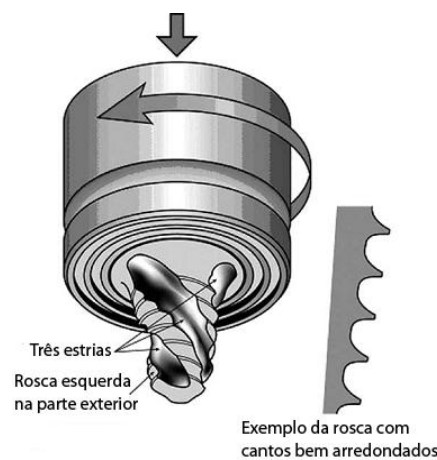


Figura 2.2: Ferramenta MX *Triflute*TM (adaptada) [1]



Figura 2.3: Ferramenta *Whorl*TM (adaptada) [1]

Apesar dos pinos cilíndricos e dos pinos *Whorl* e *Triflute* serem mais adequados para soldadura topo a topo, não são os mais indicados para soldaduras sobrepostas. Verificou-se que os pinos cilíndricos roscados produzem uma redução de espessura da chapa superior a soldar e promovem a criação de óxidos entre as duas chapas. As ferramentas *Flared-Triflute*TM e A-

*skew*TM, desenvolvidas mais recentemente, foram criadas de modo a garantir a fragmentação dos óxidos e a criar uma soldadura mais larga [1, 7].

A ferramenta *Flared-Triflute*TM é semelhante à ferramenta MX TrifluteTM, apresentando uma zona inferior mais alargada como se pode observar na figura 2.4. A ferramenta A-skewTM é uma ferramenta de rosca cónica com o seu eixo inclinado em relação ao eixo de rotação da máquina tal como se pode observar na figura 2.5 [8].

Ambas as ferramentas foram criadas com o objectivo de aumentar a razão entre o volume varrido e o volume estático do pino, melhorando assim o fluxo em torno do pino e por baixo deste. Pretendia-se também aumentar a dimensão da zona soldada através do alargamento da base, na ferramenta *Flared-Triflute*TM e da excentricidade do pino, na ferramenta A-skewTM, fragmentar os óxidos que surgiam na zona de contacto entre os materiais a soldar, e criar ainda uma acção de forjamento na raiz da soldadura de modo a melhorar a qualidade geral da mesma. Através destas alterações no desenho das ferramentas, foi possível obter um aumento de mais de 100 % na velocidade de avanço da soldadura, uma redução de 20 % na força axial, uma área soldada superior e uma menor redução da espessura da chapa superior a soldar [7, 8].

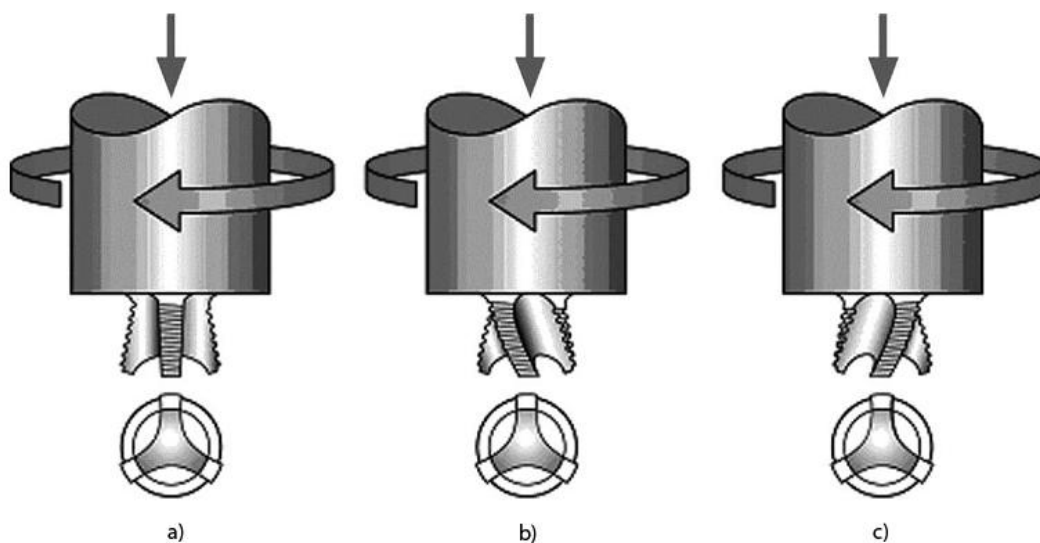


Figura 2.4: Exemplos de ferramentas *Flared-Triflute*TM:

a) estrias neutras, b) estrias esquerdas, c) estrias direitas [8]

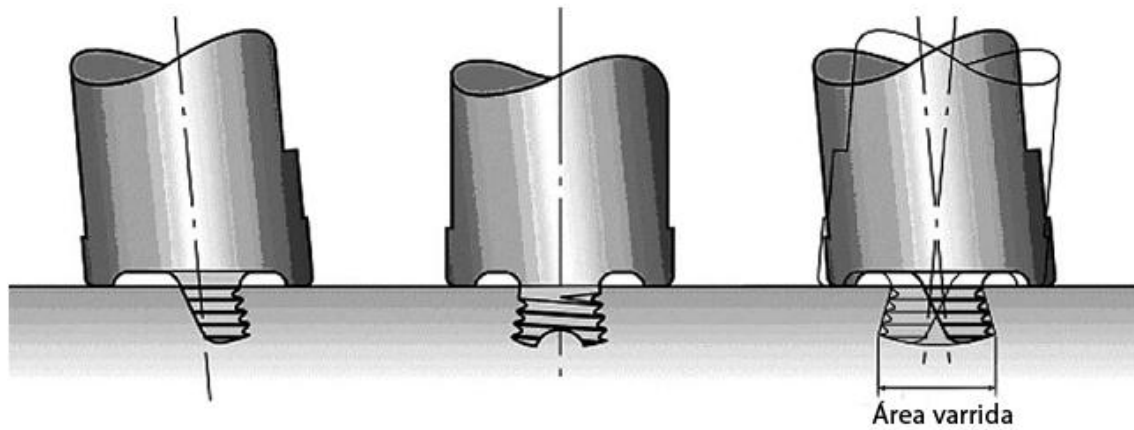


Figura 2.5: Ferramenta A-skew™ (adaptada) [8]

Para além destes avanços nas geometrias dos pinos, foram também desenvolvidas várias geometrias para os *shoulders*, de modo permitir uma adaptação aos mais variados materiais e parâmetros operatórios. Estas novas geometrias para os *shoulders* permitem obter um aumento na capacidade em manter o material plastificado no interior da soldadura. Algumas representações de várias geometrias podem ser observadas na figura 2.6 [1].

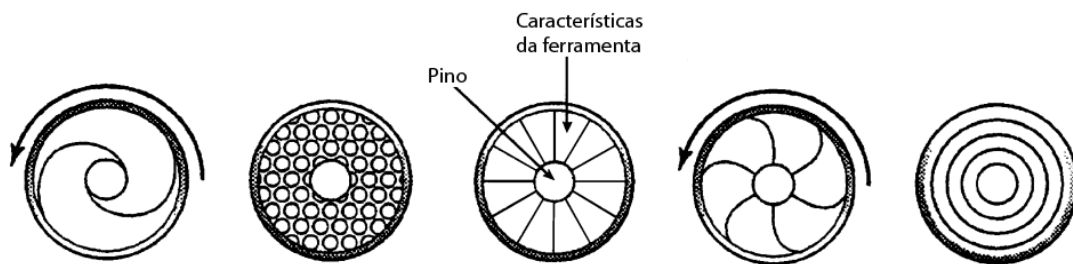


Figura 2.6: Exemplo de várias geometrias de *shoulders* (adaptada) [1]

Avaliando os efeitos da ferramenta de soldadura por fricção linear na geração de calor, verificou-se que a maior parcela de calor gerado advém do *shoulder*, e que o pino apresenta um contributo bastante inferior, como se pode observar na figura 2.7. Tais diferenças foram justificadas com a área de contacto superior e com uma força vertical maior, entre o *shoulder* e o material, quando comparado com o pino e o material base. Além disto, o *shoulder* apresenta uma velocidade linear superior devido ao seu maior raio [1].

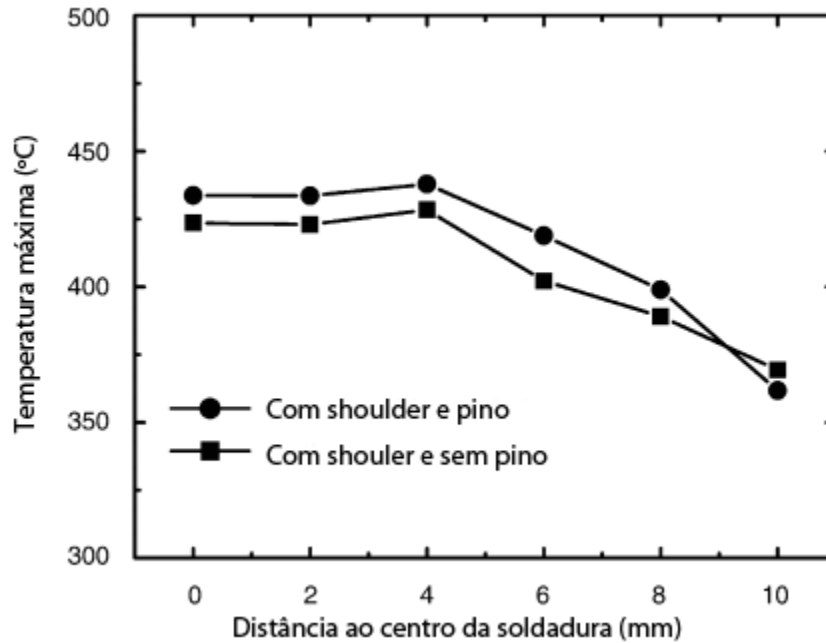


Figura 2.7: Variação da temperatura máxima de soldadura com a distância á soldadura com e sem utilização de pino na liga AA6061-T6 com 400 rev/min e 120 mm/min (adaptada) [1]

Sendo a geometria da ferramenta o factor responsável pela fricção e pelo aprisionamento do material base na zona de soldadura e, sendo a geometria da ferramenta um factor também importante para a qualidade da soldadura (devido à evolução na compreensão de como o fluxo de material decorre ao longo da soldadura) têm sido desenvolvidas as mais variadas geometrias de ferramenta de modo a obterem-se as melhores características. Estes desenvolvimentos na geometria de ferramenta pretendem também reduzir as necessidades energéticas do processo de soldadura [7]. Como tal, não existem geometrias específicas para cada soldadura que se apresenta ao operador, cabendo a este a decisão de seleccionar, com base na sua experiência e conhecimentos, a geometria que melhor se adequa.

2.2.2 Parâmetros de soldadura

Na soldadura por fricção linear, para além da geometria da ferramenta, existem outros dois parâmetros muito importantes: a velocidade de rotação (Ω , rev/min) e a velocidade de avanço da ferramenta (V , mm/min) ao longo da linha de soldadura. Da rotação da ferramenta resulta a fricção bem como a mistura do material nas imediações do pino. A translação da ferramenta propicia a movimentação do material efectivando a ligação entre os materiais.

Uma velocidade de rotação mais elevada gera uma temperatura também mais elevada do material, devido ao aumento do calor gerado por fricção, o que resulta numa agitação e numa

mistura superior do material. O aumento da velocidade de translação tem uma reduzida influência na temperatura a que a soldadura é efectuada [7].

Para além das velocidades de rotação e de avanço, surge outro parâmetro importante: o ângulo da ferramenta relativamente à superfície a soldar. Uma inclinação oposta ao sentido do avanço da ferramenta é adequada, pois permite que o *shoulder* restrinja o material plastificado pelo pino. Permite ainda o constrangimento do material evitando que ele saia da zona confinada resultando numa deficiente soldadura. A altura do pino deve ser adequada à profundidade de penetração desejada ou à espessura das chapas a unir.

Devido ao facto de ser uma soldadura no estado sólido, neste tipo de soldadura não é usado nenhum gás de protecção, sendo por isso considerada uma técnica de soldadura limpa e sem emissão de gases ou partículas, apesar da ausência de pesquisa extensa realizada para o comprovar [2]. Assim, não existe nenhum documento normativo relativo a emissões em soldadura por fricção linear.

Devido às características do processo, a emissão de nanopartículas é provocada pela fricção entre ferramenta e o material base, como tem vindo a ser afirmado no presente trabalho. Considerando esta afirmação válida, este valor pode ser avaliado directamente através do calor gerado durante a soldadura. Assim sendo, seria importante analisar as relações dos parâmetros de soldadura com os valores de temperatura gerados.

Vários autores realizaram medições de temperatura em função dos parâmetros de soldadura utilizados, como se pode observar nas figuras 2.8 e 2.9. Pode-se verificar que existe um aumento de temperatura com ao aumento da velocidade de rotação da ferramenta. O incremento na temperatura máxima atingida diminui para valores elevados da velocidade de rotação.

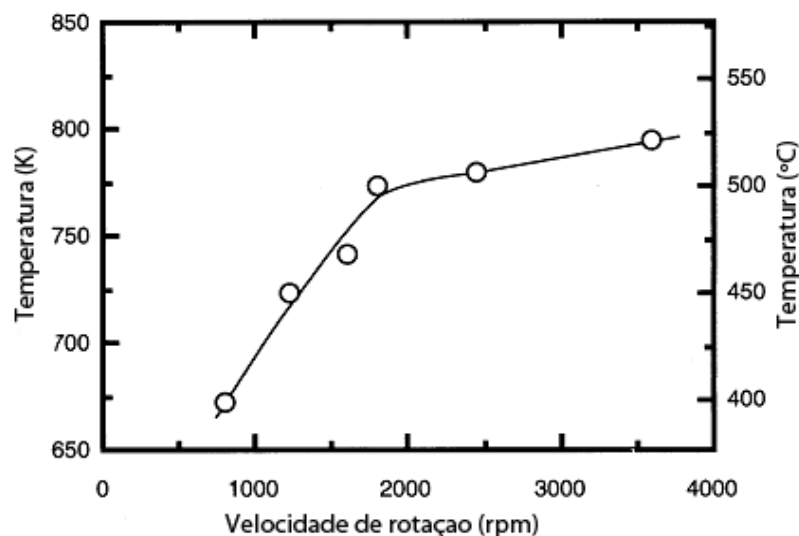


Figura 2.8: Relação entre a velocidade de rotação e a temperatura máxima atingida na soldadura na liga AA 6083 (adaptada) [9]

Na figura 2.9 pode observar-se a variação da temperatura com a distância ao centro da soldadura, para diferentes velocidades de rotação. Para este estudo, a temperatura máxima é de primordial importância.

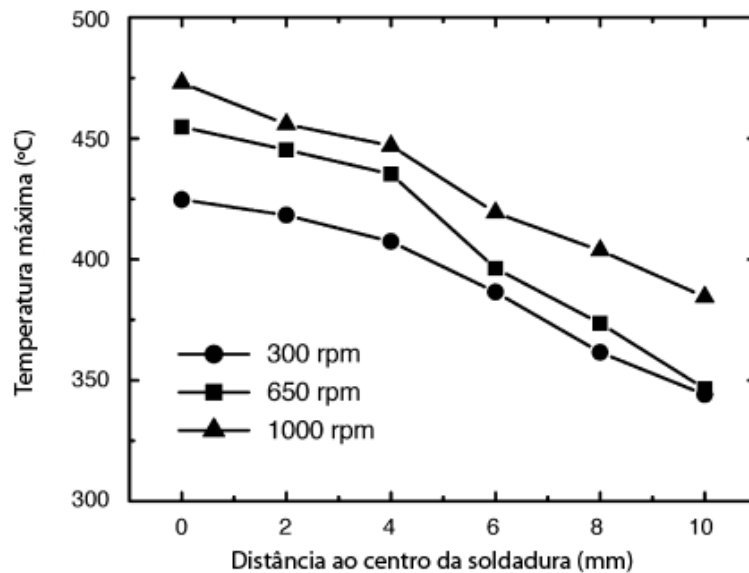


Figura 2.9: Efeitos da velocidade de rotação na temperatura máxima em função da distância ao centro da soldadura para a liga AA 6061Al-T6 (adaptada) [1]

Foram também realizadas medições de temperatura, variando a relação Ω/V em diferentes ligas de alumínio, demonstrando que, para valores superiores de Ω/V , são atingidas temperaturas mais elevadas, e que estas variam com o tipo de liga. Esta conclusão alerta também para a importância que as ligas de alumínio escolhidas podem representar nas emissões de nanopartículas. Analisando o gráfico em questão não se encontra uma relação entre as séries das ligas e a temperatura máxima atingida.

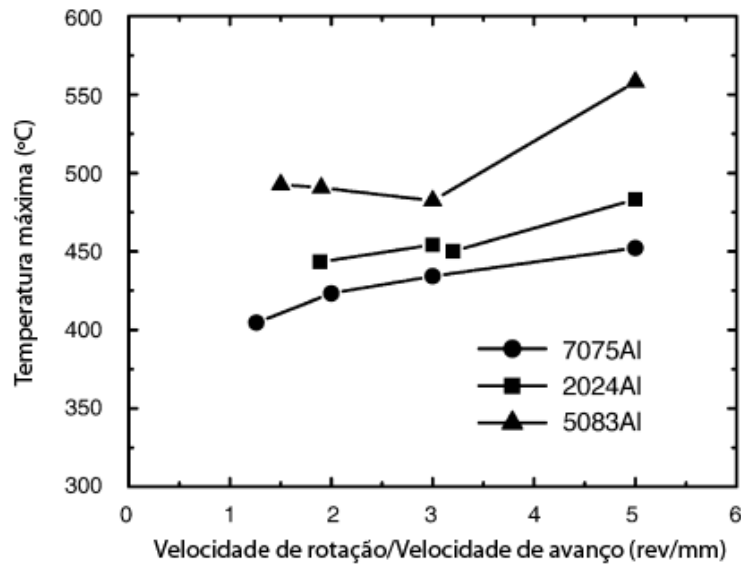


Figura 2.10: Efeitos da variação da relação V/Ω na temperatura máxima atingida na SFL das ligas AA 2024, AA 5083, e AA 7075 (adaptada) [1]

2.3 Emissões de nanopartículas na soldadura

A influência dos fumos de soldadura no corpo humano tem efeitos diferentes, dependendo da composição desses fumos. Algumas dessas composições têm efeitos a curto prazo, tais como a febre de soldadura. Contudo, os fumos de soldadura podem provocar efeitos de longo prazo como, por exemplo, a presença de manganês pode originar o desenvolvimento da doença de Parkinson. Na tabela 2.1 podem observar-se alguns dos efeitos que os componentes dos fumos de soldadura têm na saúde humana. Estes efeitos são conhecidos e identificados como provenientes de fumos de soldadura [10]. Comparativamente, na soldadura por fricção linear, será expectável um número inferior destes elementos. Devido à ausência de estudos que caracterizem quimicamente as nanopartículas emitidas na soldadura por fricção linear de ligas de alumínio [2], é razoável considerar que as emissões existentes provêm dos elementos de liga, presentes em maior percentagem, mas também provenientes do desgaste da ferramenta utilizada, sendo relevante referir os impactos que tais compostos químicos têm para a saúde, não necessariamente em dimensões nanométricas. Na tabela 2.2 faz-se também referência a alguns elementos mais comuns presentes nas ligas de alumínio e nas ferramentas, bem como os seus efeitos na saúde humana.

Tabela 2.1: Fumos de soldadura e efeitos na saúde [11, 12]

Elementos de fumos de soldadura, gases e os seus efeitos		
Elementos	Fonte	Efeitos na saúde
Crómio (VI)	Processos de soldadura. Aço inoxidável, fabricação de pigmentos de crómio, eléctrodos.	Irritação da pele, irritação do tracto respiratório, efeitos no nariz e orelhas; efeitos crónicos incluem cancro do pulmão, danos nos rins e fígado.
Óxidos de ferro	Processos de soldadura em todos os aços ou metais.	Irritação do nariz e pulmões; siderose (deposição de pós metálicos nos pulmões).
Ferro	Processos vários	Pode causar coroidite, conjuntivite, e retinite se permanecer nos tecidos oculares.
Manganês	Processos de soldadura, aços de tensão de ruptura elevada	Pneumonite química; efeitos crónicos incluem distúrbios do sistema nervoso.
Níquel	Processos de soldadura: Aço inoxidável, galvanização.	Efeitos dermatológicos, doenças pulmonares do tipo asmáticas; efeitos crónicos incluem cancro (nariz, laringe, pulmão), irritação do tracto respiratório, disfunção renal.
Fluoretos	Revestimento de eléctrodos, gás de protecção.	Irritação dos olhos, nariz e garganta. Sintomas gastrointestinais; efeitos crónicos incluem problemas de ossos e articulações, líquido nos pulmões e disfunções dos rins.
Ozono	Formado no arco eléctrico	Efeitos agudos incluem líquido nos pulmões e hemorragias; efeitos crónicos incluem alterações nas funções pulmonares.
Óxidos de nitrogénio	Formados no arco eléctrico	Pneumonite, edema pulmonar; bronquite crónica, enfisema e fibrose pulmonar.
Monóxido de carbono	Gases de protecção com dióxido de carbono e revestimentos de eléctrodos	Dores de cabeça, náuseas, tonturas, desmaios, morte; efeitos crónicos cardiovasculares.

Tabela 2.2: Principais elementos de ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear e alguns dos seus efeitos na saúde.[12]

Elemento	Efeitos
Alumínio	Danos no sistema nervoso central; Demência; Perda de memória; Apatia; Tremores graves; Fibroses pulmonares e danos pulmonares, este efeito, conhecido como Doença de Shaver, é agravado com a inalação de Óxidos de Ferro e Silício.
Silício	Não é considerado perigoso para a saúde, mas o dióxido de silício é considerado como um perigo elevado podendo provocar irritações nos pulmões e nas membranas mucosas, irritações nos olhos e pele. Foi também reportado um aumento de doenças como escleromas, artrite reumatóide, lúpus eritematoso sistémico, sarcoidose e problemas renais.
Magnésio	Irritação nas membranas mucosas e no tracto respiratório superior, e lesões oculares.
Ferro	Pode causar coroidite, conjuntivite, e retinite se permanecer nos tecidos oculares.
Cobre	Febre dos fumos metálicos com mudanças atroficas na mucosa nasal. Envenenamento crónico por cobre origina a doença de Wilson.
Zinco	Cólicas estomacais, irritações da pele, náuseas, vômitos e anemia. Níveis muito elevados de zinco podem danificar o pâncreas e perturbam o metabolismo de proteínas, e causar arteriosclerose. A exposição continuada a cloreto de zinco pode causar doenças respiratórias.

No que diz respeito aos métodos de amostragem, os mais usados tradicionalmente para recolha de partículas têm-se mostrado insuficientes para as nanopartículas. Em estudos mais recentes, foram aplicadas metodologias, como a colocação de amostradores estáticos nas áreas de trabalho, utilização de bombas de amostragem pessoal, com filtros colocados na zona de respiração do operador, ou a colocação de equipamentos de leitura em tempo real que podem ser estáticos ou pessoais. Com estes métodos e equipamentos, os parâmetros que se podem determinar são: o tamanho, a massa, a concentração e a composição química das nanopartículas. Nas metodologias aplicadas, em estudos já realizados, não foi possível contemplar a área de superfície de nanopartículas com capacidade alveolar, sendo este o parâmetro considerado mais relevante [13].

Relativamente às exposições a que os operadores em ambiente industrial podem estar sujeitos, podem-se considerar dois tipos de exposição profissional a nanopartículas: i) a exposição relacionada com a produção e utilização de nano-objectos e nano-materiais; ii) a exposição em processos cuja finalidade não é a produção ou manuseamento de nanopartículas, mas que têm como consequência a libertação de nanopartículas para o ambiente.

O segundo tipo de exposição profissional a nanopartículas pode encontrar-se na indústria, em determinados processos como os que estão indicados na tabela 2.3 [13]. Analisando os tipos de processos apresentados podem-se estabelecer algumas relações com a soldadura por fricção linear.

Tabela 2.3: Processos e potenciais fontes de emissão de nanopartículas.[13]

Tipo de processos	Exemplos de fontes de emissão
Térmicos	Soldadura de Metais; Fundição de metais; Corte de metais; Tratamentos térmicos de superfícies;
Mecânicos	Maquinação; Furação; Polimento;
Combustão	Emissões de motores; Centrais de incineração, térmicas e crematórios; Aquecimento a gás.

2.4 Nanopartículas na saúde

No sentido de determinar os principais efeitos na saúde do Homem, decorrentes da exposição a nanopartículas, têm sido efectuados vários avanços, tendo sido definida uma representação das várias regiões do aparelho respiratório pela *International Commission of Radiological Protection (ICRP)* e pela Agência Federal Americana de Protecção Ambiental (US EPA) como se pode observar na figura 2.11. As regiões representadas são as consideradas como passíveis de registar a ocorrência de deposição de nanopartículas. Foi também desenvolvido pelo ICRP um modelo de deposição de partículas no pulmão humano, para partículas em suspensão. Para a construção deste modelo foi necessário considerar vários parâmetros, tais como: a taxa de respiração, o volume do pulmão, a actividade respiratória nariz/boca, entre outras características do sistema respiratório humano [14].

Assim, é possível obter curvas de deposição, tanto para a deposição traqueobrônquial como para a deposição alveolar, dependendo dos parâmetros anteriormente referenciados. Sendo as

aplicações de higiene industrial as que mais interesse suscitem, foram desenvolvidos pela Conferência dos Higienistas Oficiais Americanos (ACGIH), parâmetros de referência para um trabalhador, de modo a tornar possível a obtenção das curvas de deposição pretendidas:

a) Parâmetros fisiológicos

Tipo de trabalhador: Homem adulto

Capacidade residual funcional: 2200 cm^3

Espaço morto extratorácico: 50 cm^3

Espaço morto bronquial: 49 cm^3

Espaço morto bronquiolar: 47 cm^3

Altura: 175 cm

Diâmetro da traqueia: 1,65 cm

Diâmetro do primeiro brônquio: 0,165 cm

b) Parâmetros relacionados com a actividade

Nível de actividade: Exercício leve

Tipo de actividade: Respiração apenas pelo nariz

Taxa de ventilação: $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$

Frequência de respiração: 15,0 inalações/minuto

Volume de inalação: 1450 cm^3

Fracção inalada através do nariz: 1,0

c) Parâmetros do aerossol

Diâmetro médio aerodinâmico: $0,001 \mu\text{m} - 0,5 \mu\text{m}$

Desvio padrão geométrico: 1,0

Densidade: $1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$

Factor de forma: 1,0

Na figura 2.12 encontram-se representadas as curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão baseadas nos parâmetros definidos anteriormente segundo o modelo do ICRP.

Na curva de deposição traqueobrônquial pode-se observar a representação da fracção de aerossol que se irá depositar na região traqueobrônquial do pulmão, enquanto na curva de

deposição alveolar encontra-se representada a fracção de aerossol que se irá depositar na região alveolar do pulmão. Em relação às nanopartículas, sabe-se que os seus efeitos na saúde serão tanto mais prejudiciais quanto mais profunda for a deposição destas partículas no aparelho respiratório. Como se pode observar, a percentagem de deposição mais elevada ocorre na região alveolar, para partículas nanométricas entre os 7 e os 50 nm, com uma eficiência de deposição superior a 35 %. Pode-se, então, afirmar que a fracção respirável do aerossol na região alveolar será a medida de maior relevância, pois a sua eficiência de deposição é superior à encontrada em qualquer momento na zona traqueobrônquial [3].

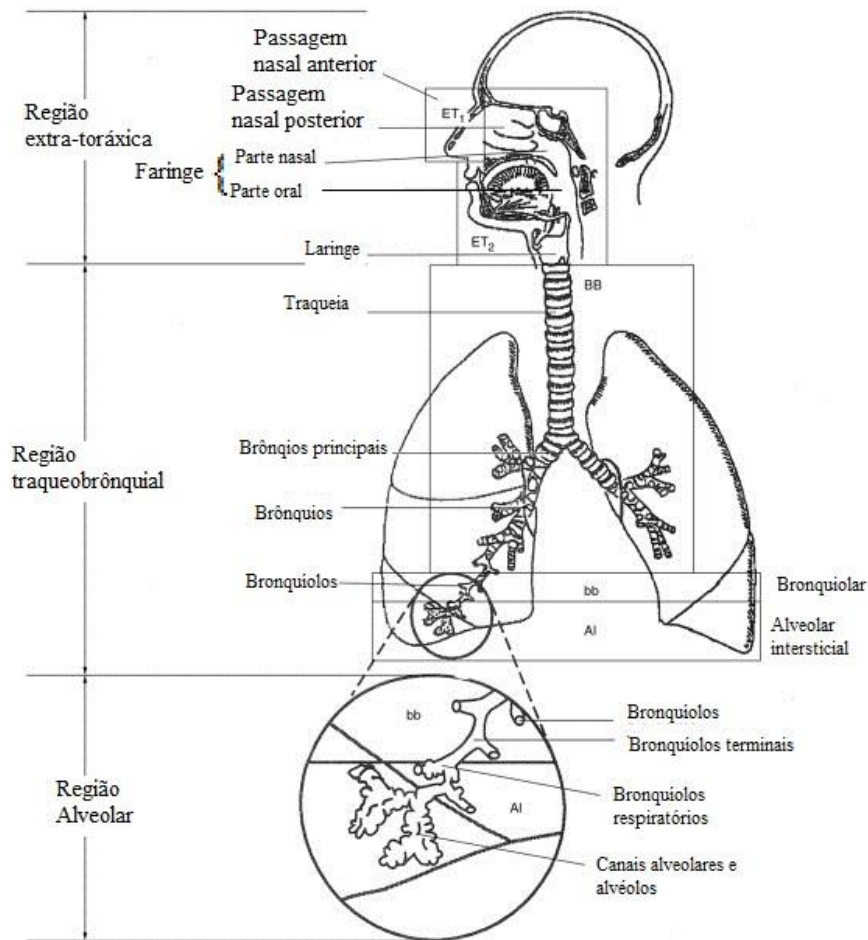


Figura 2.11: Modelo das diversas regiões do pulmão humano.[15]

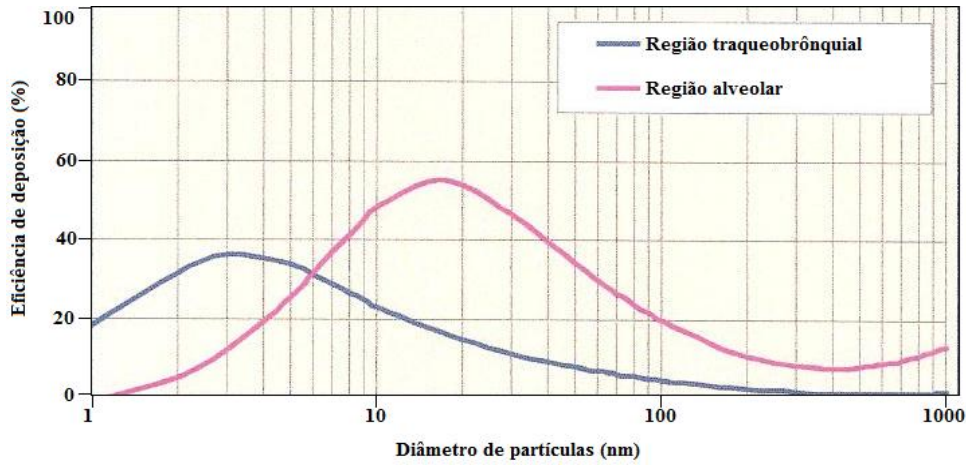


Figura 2.12: Curvas de eficiência de deposição na região traqueobrônquial e alveolar do pulmão (adaptada) [15]

Estas curvas podem ser obtidas através de uma parametrização para o modelo de deposição de partículas no pulmão humano do ICRP. Para cada região pulmonar foram obtidas as seguintes equações, que referem a eficiência de deposição expressa como um rácio da concentração total de partículas suspensas.

A eficiência de deposição de partículas na região do nariz (cabeça), de acordo com o modelo criado pelo ICRP, é dada pela equação 2.1 [3] em que d representa o diâmetro da partícula em μm e I representa a fracção de partículas inaláveis.

$$D_{HA} = I(d) \left(\frac{1}{1 + 934d^{1.183}} + \frac{1}{1 + 934d^{1.183}} \right) \quad (2.1)$$

A fracção de partículas suspensas que são inaladas é calculada pela equação:

$$I(d) = 1 - 0.5 \left(1 - \frac{1}{1 + 0.00076d^{2.86}} \right) \quad (2.2)$$

A eficiência de deposição na região traqueobrônquial é calculada pela equação:

$$D_{TB} = \frac{0.00352}{d} (\exp(-0.234(\ln d + 3.40)^2) + 63.9 \exp(-0.819(\ln d - 1.61)^2)) \quad (2.3)$$

Finalmente, a eficiência de deposição na região alveolar pode ser determinada pela equação:

$$D_{TB} = \frac{0.0155}{d} (\exp(-0.416(\ln d + 2.84)^2) + 19.11 \exp(-0.482(\ln d - 1.362)^2)) \quad (2.4)$$

A eficiência total de deposição das partículas em todas as regiões é dada apenas pela soma das eficiências de cada região. A capacidade de deposição em cada região do sistema respiratório consiste em dois modelos, um que corresponde à parte depositada por difusão e outro que corresponde à parte depositada aerodinamicamente. Estes dois modelos correspondem aos primeiros e aos segundos termos das equações 2.1, 2.3 e 2.4, respectivamente [15].

2.5 Técnicas para a recolha e análise de nanopartículas

Tendo por base os avanços recentes nas estratégias de monitorização de emissões para objectos nano fabricados, foram identificados os parâmetros e metodologias recomendados para caracterizar emissões de nanopartículas. Na tabela 2.4 indicam-se as recomendações referentes à recolha e análise de nanopartículas e, na tabela 2.5 as relativas à microscopia electrónica. Na tabela 2.6 estão indicadas algumas informações essenciais para caracterizar a tarefa para a qual a emissão de nanopartículas vai ser medida [16].

Tabela 2.4: Recomendações preliminares para a recolha e análise de dados

Assunto	Recomendação preliminar
Conjunto de dados mínimos	<p>Concentração com um valor estatisticamente representativo, e distribuição de tamanho de partículas ou concentração de partículas com informações sobre a área de superfície ou concentração do número de partículas por pelo menos dois intervalos de tamanho (<100 e >100 nm).</p> <p>Uma identificação qualitativa e identificação dos elementos presentes nas partículas.</p>
Amostragem	<p>Medição em tempo real baseada em tarefas, registo de valores máximos e registo do tempo por tarefa.</p> <p>Medições em tempo real com cálculo da média ao longo de um turno</p>
Distinção da envolvente	<p>A abordagem para a distinção nanopartículas em suspensão de segundo plano devem ser claramente descritos e documentados.</p> <p>Descrever a presença de outras fontes de nanopartículas.</p> <p>Contrastar as distribuições de tamanho estatisticamente representativos devido às emissões de fundo de outros processos.</p>
.Processamento e análise de dados	<p>Verificar se os dados têm uma distribuição lognormal.</p> <p>Verificar a Auto correlação e estacionaridade (parcial) (por exemplo modelo auto-regressivo integrado de média móvel).</p> <p>Calcular média aritmética ou média geométrica, desvio padrão geométrico e outras estatísticas de resumo.</p>

Tabela 2.5: Recomendações preliminares para relatar os resultados de microscopia electrónica

Assunto	Recomendações preliminares
Equipamentos de recolha	Relatar uso de instrumentos especializados como precipitadores electrostáticos ou térmicos ou (de grelhas TEM anexado a) filtros. Referir a uniformidade de deposição.
Substrato de recolha	Especificar filtro (revestimento), e tamanho da grelha TEM.
Seleção do filtro/rede para análise e ampliação	Relatar localização e método de selecção. Relatar níveis de ampliação diferentes, para fornecer informações sobre o carregamento, a uniformidade, a representatividade das imagens, etc. Relatar número de campos, número de partículas por campo, número mínimo de partículas contadas por secção, a selecção de campos (aleatório). Relatar categorias de morfologia (livre, aglomerados e as categorias de formas).
Controlo de qualidade para grelhas TEM	Analisar grelhas de fundo, como referência. Discutir questões de controlo de qualidade.
Outros	Analisar as amostras por energia dispersiva de raios X. Se possível, reconstruir a distribuição de tamanho a partir das imagens TEM para validar os instrumentos de análise em tempo real [2].

Tabela 2.6: Recomendações preliminares sobre a informação essencial a fornecer

Recomendações
A entidade que recolhe as amostras.
O edifício em que as amostras forem recolhidas.
A localização (dentro do edifício) em que as amostras são recolhidas.
O trabalhador que está a operar o equipamento ou que está presente durante a medição.
Os equipamentos de amostragem e posicionamento.
Uma descrição adequada do processo e das instalações.
A actividade que é realizada durante a medição (com referencia para possíveis alterações nas emissões devido a outros factores).
Referir equipamentos para redução da exposição dos operadores por exemplo, escape de ventilação, equipamentos de protecção pessoal e outras medidas de controlo que estão em vigor durante a medição.
As condições climáticas durante a medição, por exemplo, temperatura e humidade relativa.
O produto (com ingrediente activo nanométrico) que é utilizado durante a actividade.
Os resultados da medição que são derivados a partir do dispositivo de medição.

As recomendações anteriormente apresentadas são consideradas de grande importância para a caracterização de emissões de partículas nano fabricadas. Tendo em conta a inexistência de recomendações relativas às emissões de nanopartículas ambientais, provenientes dos mais variados processos, este estudo baseou-se nas mesmas recomendações de modo a constituir uma base científica documentada para a realização de trabalhos futuros.

2.6 Emissões de partículas na soldadura por fricção linear

Apesar da escassez de estudos que documentem a emissão de nanopartículas, provenientes da soldadura por fricção linear, considera-se que a libertação de nanopartículas pode ocorrer devido à natureza do processo, nomeadamente devido à fricção entre os materiais a soldar e a ferramenta, como já foi referido anteriormente. É portanto importante fazer variar os diferentes parâmetros do processo que originam estes fenómenos, nomeadamente, a temperatura atingida e a movimentação do material durante a soldadura.

Foi efectuado um estudo recente para determinar a emissão de nanopartículas durante a soldadura por fricção linear. Os resultados obtidos alertam para a necessidade de serem estudadas as emissões sob o ponto de vista da saúde dos operadores. Devido a este ser o único estudo realizado na área, revela-se pertinente referir, em detalhe, os resultados obtidos pelo mesmo [2].

No estudo em causa, os ensaios foram realizados em duas ligas de alumínio, AA5083-H111 e 6061-T6, cada uma soldada com duas velocidades de rotação diferentes, 900 e 1500 rev/min ao longo de 100 mm, durante 40 segundos sendo a recolha de nanopartículas realizada a 92 cm (zona de respiração do operador) e a 20 cm da soldadura, para cada um dos casos. Foi utilizado um *shoulder* côncavo (nenhuma referência foi feita à existência de estrias ou outras geometrias), e um pino roscado. Para todas as soldaduras foi utilizada uma penetração do pino aproximadamente igual. Os cordões de soldadura realizados foram do tipo *bead on plate* (cordões realizados sem ligação de diferentes peças) e realizados ao longo do mesmo trajecto (sobrepostos). Apesar de não ser referido no estudo, a escolha deste tipo de pino parece ser adequada pois origina uma maior agitação no material e um maior aumento da temperatura, quando comparado com um pino não roscado, o que pode potenciar a geração de nanopartículas. No estudo é utilizado um pino com uma geometria simples e um *shoulder* liso e côncavo. Neste caso poderia ter sido utilizado um *shoulder* estriado de modo a originar uma maior geração de calor e consequentemente uma maior libertação nanopartículas, sem escolher geometrias demasiado complexas. Seria também de interesse variar o tipo de pino e *shoulder* a utilizar, com o objectivo de caracterizar as diferenças que a alteração da geometria introduziria na geração de partículas. Neste caso poderia verificar-se a validade das afirmações referentes à relação entre movimentação do material e temperatura devido à geometria da ferramenta com as emissões na soldadura por fricção linear.

No estudo referido concluiu-se que as emissões de nanopartículas estão directamente relacionadas com a realização da soldadura por fricção linear e que as variações na relação Ω/V sofrem alterações. Verificou-se uma grande variação na distribuição de nanopartículas entre as medições na fonte, e na zona de respiração do operador. Foi analisada a emissão, variando as velocidades de rotação e o tipo de liga de alumínio, mas foram observadas diferenças significativas na fonte. Contudo, diferenças mais relevantes foram observadas na zona de respiração do operador, em particular para a liga 5083-H111, para a qual para maiores valores de Ω se observaram maiores concentrações de nanopartículas libertadas. Também se verificou que as nanopartículas de maiores dimensões são geradas para valores mais elevados de Ω .

A composição química das nanopartículas libertadas está relacionada com a composição do material base, apresentando o Al, o Fe e o Zn valores mais elevados, e valores residuais de Ni, Cr e Mn, como seria de esperar quando se observa a composição das ligas utilizadas.

A concentração de Zn, presente nas nanopartículas recolhidas, é muito superior ao esperado, quando comparada com a percentagem presente nas ligas de alumínio usadas. Tais valores podem ser explicados, segundo os autores, devido ao seu ponto de fusão mais baixo. O Zn poderá ter fundido junto à superfície do pino e como tal a sua emissão seria superior. Outra possível justificação está relacionada com o facto do lubrificante usado na fresadora ter altos teores de Zn, o que poderá ter contaminado a recolha dos dados. Tendo em conta a temperatura de fusão do elemento e os valores típicos de temperatura na soldadura por fricção linear, encontrados em diferentes estudos, pode-se supor que seria passível de atingir temperaturas próximas, mas nunca atingir a temperatura do ponto de fusão. Como tal, esta justificação não aparenta ser a mais plausível. Uma justificação mais credível para esse facto, será a existência na mesa de suporte do equipamento, de lubrificantes com elevados teores de zinco.

O estudo efectuado teve como objectivos, para além de avaliar da existência de nanopartículas, obter uma metodologia eficiente para caracterizar a exposição de investigadores e estudantes num laboratório universitário, e determinar ainda as suas principais características físico-químicas.

Neste estudo foram utilizados variados instrumentos de aquisição de dados de nanopartículas, podendo ser agrupados em equipamentos de análise em tempo real e instrumentos para a recolha de nanopartículas para análise posterior.

O estudo em causa documentou pela primeira vez as emissões de nanopartículas, decorrentes da soldadura por fricção linear, e refere a sua composição química bem como as emissões. Foi verificada também a possibilidade de existirem exposições substanciais a partículas de Al, Fe e Zn, pelo que os autores referem a necessidade de se proceder uma investigação mais profunda em ambientes industriais.

É também referida a necessidade de avaliar parâmetros essenciais, tais como a distribuição por tamanhos, a área de superfície, a composição química e a morfologia, sendo também necessário avaliar as variações espaciais e temporais da emissão de nanopartículas.

Os dados referentes à área superficial de partículas depositadas no pulmão humano, expressas em micrómetros quadrados por centímetro cúbico ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) (valor mais relevante para a saúde dos operadores), não foi devidamente explorado, nem foi apresentada a sua variação ao longo do tempo de soldadura, tendo sido dada mais relevância à composição química e à distribuição por tamanhos de partículas emitidas [2]. Finalmente foi referida a relação entre os parâmetros de soldadura e as emissões, mas seria necessário analisar também alguns parâmetros importantes, de modo a obter uma melhor compreensão das emissões de nanopartículas. Seria também importante monitorizar os parâmetros e as emissões de forma mais profunda.

2.7 Conclusão

Neste capítulo analisaram-se estudos anteriores sobre emissão de nanopartículas em soldadura e em particular na SFL. Identificou-se apenas um estudo publicado até ao momento o que pode ser justificado por se tratar de um processo relativamente recente e considerado limpo. Contudo, os resultados apontam a necessidade de um estudo mais aprofundado com o objectivo de identificar e avaliar emissões de modo a preconizar formas de proteger os operadores.

Conclui-se também que as emissões podem estar relacionadas com diversos factores e parâmetros, sendo inicialmente necessário fazer uma escolha entre os parâmetros a variar, com base na sua importância para os fenómenos mecânicos, nos quais se baseia a soldadura por fricção linear, bem como na sua possível relevância para a emissão de nanopartículas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as técnicas e metodologias utilizadas para a avaliação das emissões de nanopartículas na soldadura por fricção linear, bem como uma descrição do equipamento utilizado para recolha e análise de nanopartículas, o equipamento e as ferramentas utilizadas para efectuar as soldaduras.

Os ensaios foram realizados em duas fases distintas, sendo a primeira, uma fase preliminar em que a soldadura foi realizada recorrendo a uma fresadora convencional adaptada para a realização do processo em que se pretendeu: i) avaliar a existência de emissões, e a sua capacidade de deposição na zona alveolar de pulmão humano e, ii) avaliar as diferenças existentes devido à variação da distância à qual se efectuam as medições. Numa fase posterior, os ensaios realizaram-se num equipamento dedicado para soldadura por fricção linear, com capacidade para recolher dados referentes aos parâmetros utilizados em tempo real. Nesta fase de ensaios realizaram-se medições de área de superfície das partículas por volume de pulmão humano, medições de granulometria e efectuaram-se ainda recolhas de nanopartículas para posterior análise microscópica.

3.2 Equipamentos de soldadura

3.2.1 Fresadora Convencional

Para a realização da primeira fase experimental foi utilizada uma fresadora convencional, adaptada para soldadura por fricção linear, localizada no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

3.2.2 Equipamento de Soldadura por fricção linear

Para a realização da soldadura por fricção linear na segunda fase dos ensaios foi utilizado o equipamento do Instituto Superior Técnico (IST), uma máquina da ESAB LEGIO™ FSW 3U (figura 3.1)

Este equipamento permite automatizar o processo e gravar os valores dos parâmetros operatórios utilizados (velocidade de rotação, velocidade de avanço, força vertical e posicionamento nos três eixos de movimento) o que se revelou muito importante para a caracterização do processo e relacioná-lo com as emissões de nanopartículas. As principais características do equipamento são indicadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificações técnicas LEGIO™ FSW 3U [17]

Especificação técnica	Valor
Curso no eixo X	1000 mm
Curso no eixo Y	400 mm
Curso no eixo Z	340 mm
Velocidade máxima de soldadura	2 m/min
Ângulo de Soldadura	+/- 5°
Velocidade de rotação	100-3000 rev/min
Força vertical	25 kN
Potência de rotação	11 kW
Potência total	17 kW
Alimentação	400 V 50 Hz
Nível de Ruído a 1 metro do equipamento	84 dB(A)



Figura 3.1: Equipamento LEGIO™ FSW 3U [17]

3.3 Equipamentos para recolha, medição e análise de nanopartículas

Tendo como objectivo uma caracterização completa do processo e das nanopartículas emitidas, foram seleccionados três equipamentos distintos: um para medição em tempo real (1 segundo de tempo de resposta) da deposição na zona alveolar ou traqueobrônquial, outro para recolha de partículas para posterior análise microscópica, e um terceiro para medir a distribuição granulométrica das partículas. De seguida, apresenta-se uma breve explicação de cada um destes equipamentos.

Utilizaram-se dois microscópios electrónicos de transmissão para a análise da morfologia e para análise da composição das nanopartículas recolhidas, a seguir referidos.

3.3.1 Nanoparticle Surface Area Monitor

O equipamento utilizado na avaliação da exposição a nanopartículas, figura 3.2, foi um medidor NSAM (*Nanoparticle Surface Area Monitor*) TSI, Modelo 3550. Este equipamento mede a área superficial de nanopartículas depositadas no pulmão humano, expressa em micrómetro quadrado por centímetro cúbico ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). Este equipamento permite avaliar a deposição de partículas em duas zonas distintas do aparelho respiratório, nomeadamente as regiões traqueobrônquial (TB) e região alveolar (A) do pulmão.



Figura 3.2: NSAM 3550, monitor de área de superfície de nanopartículas [18].

O funcionamento do equipamento baseia-se na difusão de cargas electrostáticas nas partículas da amostra, as quais são carregadas e detectadas por um electrómetro. A amostra é recolhida através de uma bomba, passando de seguida num ciclone que retém as partículas com dimensões superiores a $1\ \mu\text{m}$. Após esta fase o fluxo de ar e de nanopartículas é dividido em dois fluxos: um dos fluxos com um caudal de $1\ \text{l/min}$ passa por um filtro de carbono, um filtro HEPA, e finalmente por um ionizador que induz cargas positivas nas partículas presentes no fluxo de ar. Por fim é conduzido até uma câmara de mistura. O restante fluxo, com um caudal de $1,5\ \text{l/min}$, passa directamente para a câmara de mistura, onde se mistura com o fluxo ionizado e o fluxo de partículas é carregado por difusão. O fluxo atravessa um sistema de aprisionamento de iões, onde os iões em excesso são removidos. A tensão do sistema de aprisionamento de iões pode ser alterada de modo a poder optar entre o modo traqueobrônquial e o alveolar [18].

Finalmente o fluxo de partículas carregadas segue para o electrómetro, onde a carga é medida. Após o processamento da informação são obtidos os valores apresentados como área de superfície por volume de pulmão.

Para avaliação da exposição a nanopartículas, o equipamento é operado no modo A, correspondendo à deposição de partículas na região alveolar do pulmão de um trabalhador de referência, de acordo com os modelos da ICRP e da ACGIH [15].

Na figura 3.3 pode observar-se o esquema de funcionamento do equipamento em questão.

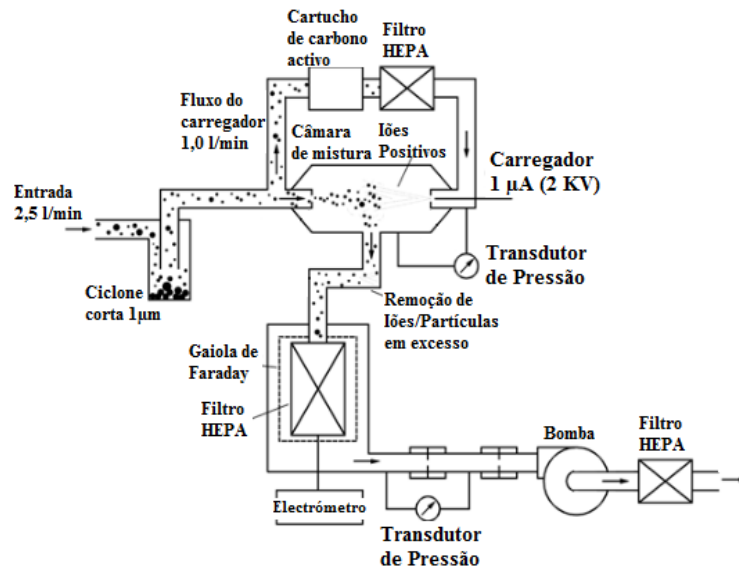


Figura 3.3: Esquema de funcionamento do NSAM [18]

3.3.2 Nanometer Aerosol Sampler

Para uma posterior análise das nanopartículas em suspensão utilizou-se um equipamento de recolha de amostras de nanopartículas NAS, modelo 3089 da TSI, ilustrado na figura 3.4. O equipamento utilizado é um precipitador electrostático concebido para capturar partículas com dimensões entre 2 e 100 nm, em grelhas de cobre, específicas para análise TEM, substratos para AFM, ou lamelas de vidro.



Figura 3.4: *Nanometer Aerosol Sampler Model 3089* [19]

As partículas em suspensão no ar são recolhidas através de uma bomba localizada no interior do equipamento, em que as partículas são atraídas através de um eléctrodo para o local onde se encontra o substrato de recolha, e o ar aspirado é de seguida bombeado para o exterior.

Para facilitar a preparação das amostras optou-se pela utilização de grelhas de cobre, as quais são consideradas mais adequadas para este tipo de recolha e análise, e não requerem uma posterior preparação.

As grelhas utilizadas são grelhas de cobre com 3 mm de diâmetro revestidas a TEDLAR.

Na figura 3.5 observa-se o esquema de funcionamento do equipamento.

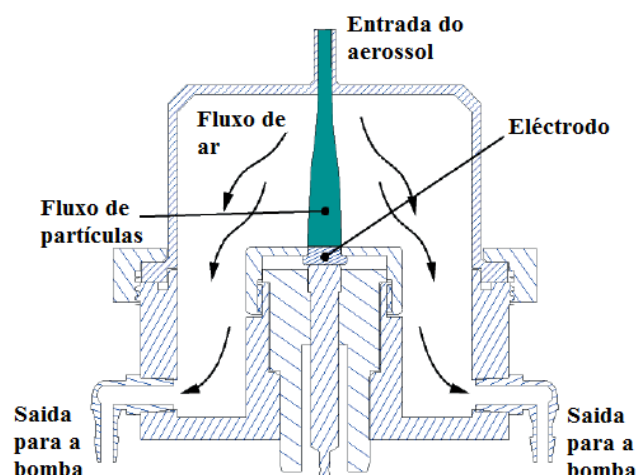


Figura 3.5: Esquema de funcionamento do NAS [19]

3.3.3 *Scanning Mobility Particle Sizer*

O equipamento *Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS 3034)* é um equipamento capaz de efectuar medições do diâmetro de nanopartículas, entre 10 e 487 nm e da sua concentração, até um máximo de 10^7 partículas por centímetro cúbico de ar. Na figura 3.6 pode observar-se o equipamento *Scanning Mobility Particle Sizer*.

O SMPS 3034 tem a capacidade de fornecer medições contínuas usando um *software* de calendarização das medições. O equipamento é acompanhado por um *software* fornecido pela TSI e oferece um leque de representações gráficas. Permite também a apresentação dos dados das medições efectuadas na forma de tabelas.



Figura 3.6: SMPS 3034 [20]

O SMPS 3034 opera separando as partículas com base na sua mobilidade eléctrica. Partículas de um determinado tamanho, são detectadas opticamente, usando uma tecnologia que aumenta a visibilidade de uma partícula através do aumento da mesma pela condensação de vapor de álcool butílico. O tempo mínimo de medição é de 180 segundos.

É utilizado um *Differential Mobility Size Analyzer (DMA)* no qual as partículas são separadas através de uma relação conhecida, entre a sua dimensão e a força do campo eléctrico criado, sendo assim determinado o seu diâmetro de mobilidade eléctrica.

A contagem das partículas de determinado tamanho é feita fazendo passar as partículas separadas através de um feixe de raios laser. A difracção da luz é detectada usando um foto detector. De modo a melhorar a detecção, estas partículas passam por um saturador onde

recolhem vapor de álcool butílico, e numa fase seguinte, são arrefecidas ocorrendo a condensação do álcool sobre as partículas, aumentando-as assim para um tamanho detectável. Este componente é conhecido como contador de partículas com condensação ou CPC do inglês *Condensation Particle Counter*.

As medições são recolhidas utilizando um *software* específico para o efeito que apresenta os dados sobre a forma de tabelas ou gráficos [20].

3.3.4 Microscópios electrónicos de transmissão

Foram utilizados dois microscópios electrónicos de transmissão, sendo um deles da marca *Hitachi*, Modelo H-8100 II de 200 KV disponível no IST - *MicroLab, Electron Microscopy Laboratory* (ICEM/IST). Este equipamento é constituído por um canhão de electrões por emissão térmica, equipado com um sistema de microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X (EDS), com detector de elementos leves, e com aquisição digital de imagem através de uma câmara [21].

Na figura 3.7 pode observar-se uma fotografia do microscópio electrónico de transmissão do *MicroLab* (ICEM/IST), utilizado no presente trabalho.

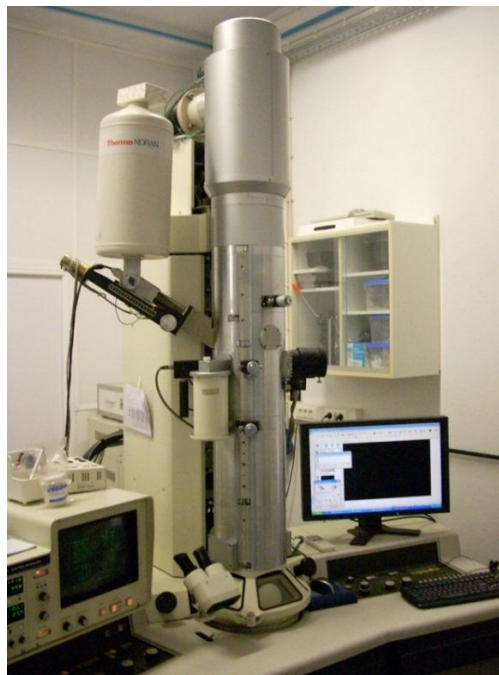


Figura 3.7: Microscópio electrónico de transmissão Hitachi H-8100 II

Foi utilizado também um segundo microscópio electrónico de transmissão, da marca FEI-Tecnai, Modelo G2 S20 com elevada resolução, de 200 KV presente no CEMUC (Centro de Eng^a Mecânica da Universidade de Coimbra), Dept. Eng^a Mecânica, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra [21].

Na figura 3.8 pode observar-se o microscópio electrónico de transmissão do CEMUC.



Figura 3.8: Microscópio electrónico de transmissão FEI-Tecnai, modelo G2 S20 [21]

3.4 Caracterização de materiais

Para a realização dos ensaios propostos foram utilizadas duas ligas de alumínio, frequentemente utilizadas na soldadura por fricção linear, com o objectivo de replicar casos frequentes na indústria.

Para isso seleccionaram-se a liga AA 5083-O, muito utilizada na indústria naval, bem como em componentes estruturais na área dos transportes e em aplicações militares [22] e a liga AA 6082- T6 bastante comum na indústria. O principal elemento de liga presente no alumínio AA 5083 é o magnésio com cerca de 5 % que fornece uma boa resistência mecânica e uma alta resistência à corrosão em água salgada. A liga AA 6082 é composta maioritariamente por magnésio, manganês e silício, o que resulta numa liga de dureza mais elevada. A composição de ambas as ligas pode ser observada na tabela 3.2.

As chapas utilizadas tinham uma espessura de 3 mm, no caso da liga AA 5083-O, e de 8 mm no caso da liga AA 6082-T6.

Tabela 3.2: Composição das ligas AA 5083 e AA 6082 [23, 24]

Elementos de liga	Quantidade em percentagem de peso	
	AA 5083	AA6082
Alumínio, Al	92,4 - 95,6	95,2 - 98,3
Crómio, Cr	0,050 - 0,25	≤ 0,25
Cobre, Cu	≤ 0,10	≤ 0,10
Ferro, Fe	≤ 0,40	≤ 0,50
Magnésio, Mg	4,0 - 4,90	0,60 - 1,20
Manganês, Mn	0,40 - 1,0	0,40 - 1,0
Outros, cada	≤ 0,050	≤ 0,050
Outros, total	≤ 0,15	≤ 0,15
Silício, Si	≤ 0,40	0,70 - 1,30
Titânio, Ti	≤ 0,15	≤ 0,10
Zinco, Zn	≤ 0,25	≤ 0,20

Devido à possibilidade de existir algum desgaste da ferramenta é também relevante referir a composição química do aço, a partir do qual foram fabricados o pino e ferramenta.

Ambos os componentes da ferramenta foram obtidos a partir do aço H13 AISI (W.N.º 1.2344), cuja composição química se indica na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Composição química do aço H13 AISI [25]

Elementos de liga	Quantidade em percentagem de peso
Carbono, C	0,320 - 0,40
Crómio, Cr	5,13 - 5,25
Ferro, Fe	≥ 90,95
Molibdénio, Mo	1,33 - 1,40
Silício, Si	1,0
Vanádio, V	1,0

3.5 Parâmetros de Soldadura

3.5.1 Primeira fase de ensaios

Os ensaios de soldadura por fricção linear podem ser caracterizados pela relação $\frac{V \text{ mm/min}}{\Omega \text{ rot/min}}$. Realizaram-se ensaios com relações de 6,2 e 2,5 para cada liga de alumínio, sendo a relação de 6,2 considerada uma soldadura quente, e a de 2,5 uma soldadura fria. A soldadura realizada foi do tipo *bead on plate*.

Os ensaios foram efectuados na fresadora convencional, utilizando as velocidades de rotação da ferramenta apresentados na tabela 3.4. Para cada caso foi realizada uma réplica de modo a garantir a fiabilidade dos dados obtidos.

Todos os ensaios foram efectuados com uma velocidade de avanço constante V , de 180 mm/min, e optou-se por manter um ângulo de soldadura nulo e constante em todos os ensaios. Uma vez que a soldadura foi realizada numa fresadora, sem controlo de força vertical, a mesma não pôde ser definida e/ou verificada, tornando-se numa variável desconhecida no processo. Em todos os casos foi considerado um tempo de soldadura constante, t de 1 min.

Tabela 3.4: Parâmetros de soldadura da primeira fase de ensaios

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Material	AA 5083		AA 6082	
Ω [rev/min]	1120	450	1120	450
Ω/V	6,2	2,5	6,2	2,5

3.5.2 Segunda fase de ensaios

De modo a validar os dados obtidos na primeira fase experimental, foram realizados ensaios experimentais utilizando os parâmetros de soldadura mais próximos dos utilizados na primeira fase de experimentação. Contudo, foi necessário adequar estes parâmetros ao equipamento LEGIO™ mantendo uma soldadura mais quente e outra mais fria. Foi definida a mesma velocidade de avanço, com 150 mm/min. Na tabela 3.5 indicam-se as velocidades de rotação de

soldadura, utilizados para cada liga. Na segunda fase de ensaios optou-se também por manter o ângulo de soldadura nulo.

Tabela 3.5: Parâmetros de soldadura da segunda fase de ensaios

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Material	AA 5083		AA 6082	
Ω [rev/min]	450	1120	800	1120
Ω/V	3	7,46	5,33	7,46

Para cada condição de ensaio fez-se uma réplica de modo a verificar a tendência e a validar as medições efectuadas. Nos casos em que os valores se apresentaram muito diferentes, entre o ensaio e réplicas, realizou-se uma segunda réplica.

No capítulo seguinte são apresentadas as medições referentes a cada caso, com os parâmetros de soldadura reais recolhidos pelo equipamento de soldadura por fricção linear utilizado.

3.6 Ferramenta de soldadura por fricção linear

A ferramenta de soldadura por fricção linear utilizada era constituída por um *shoulder* plano com 15 cm de diâmetro com duas estrias helicoidais. O pino utilizado tinha uma forma cilíndrica, roscado e com as dimensões representadas na figura 3.9.

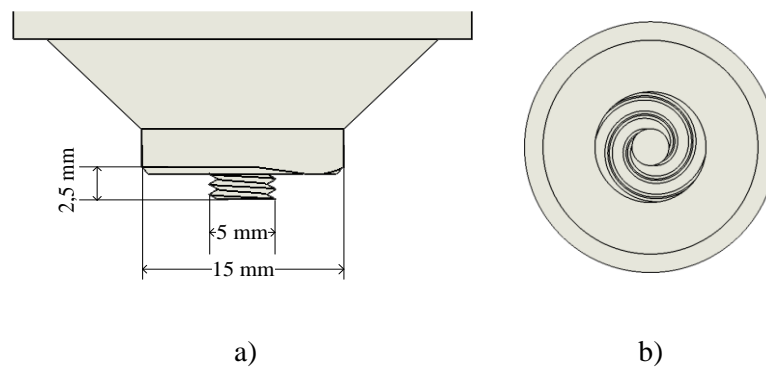


Figura 3.9: Ferramenta SFL a) pino e *shoulder*; b) *shoulder*

3.7 Instalação experimental

3.7.1 Primeira fase de ensaios

As medições efectuaram-se recorrendo ao *Nanoparticle Surface Area Monitor* (NSAM TSI, Modelo 3550) com a opção de medição de deposição alveolar seleccionada, de modo a ser avaliada a deposição de nanopartículas por unidade de área correspondentes à região alveolar. Foi definido no *software* do equipamento, um intervalo de gravação dos valores de deposição, de 10 segundos.

Foram também recolhidas partículas recorrendo ao equipamento NAS para uma posterior análise química e morfológica. Para o NAS foi definido um ponto específico idêntico, para cada um dos casos em estudo, como se pode observar na figura 3.10. Através deste equipamento efectuou-se uma recolha constante, para cada liga de alumínio utilizada, procedendo-se à mudança da grelha de cobre aquando da mudança de liga de alumínio. No equipamento NAS optou-se por um valor de cerca de -5 KV e 2 l/min de caudal.

Foram definidos vários pontos de recolha para o NSAM 3550 de modo a caracterizar, não só as emissões sob o ponto de vista do processo, mas também a relação entre o valor da deposição e a distância do operador.

Pontos de recolha:

- 14 cm do local de soldadura, considerado como medição na ferramenta;
- 34 cm do local de soldadura, considerado como a zona de respiração do operador;
- 91 cm do local de soldadura, considerado como a medição da envolvente.

Os pontos de recolha foram escolhidos com base nos locais mais críticos para o operador, e de modo a avaliar o ambiente envolvente. Uma representação esquemática da instalação experimental pode ser observada na figura 3.10. As medições através do equipamento NSAM 3550 iniciavam-se no instante em que o pino da ferramenta entrava em contacto com o material.

As posições absolutas dos pontos de recolha mantiveram-se constantes para todos os casos, de modo a manter a coerência entre os ensaios.

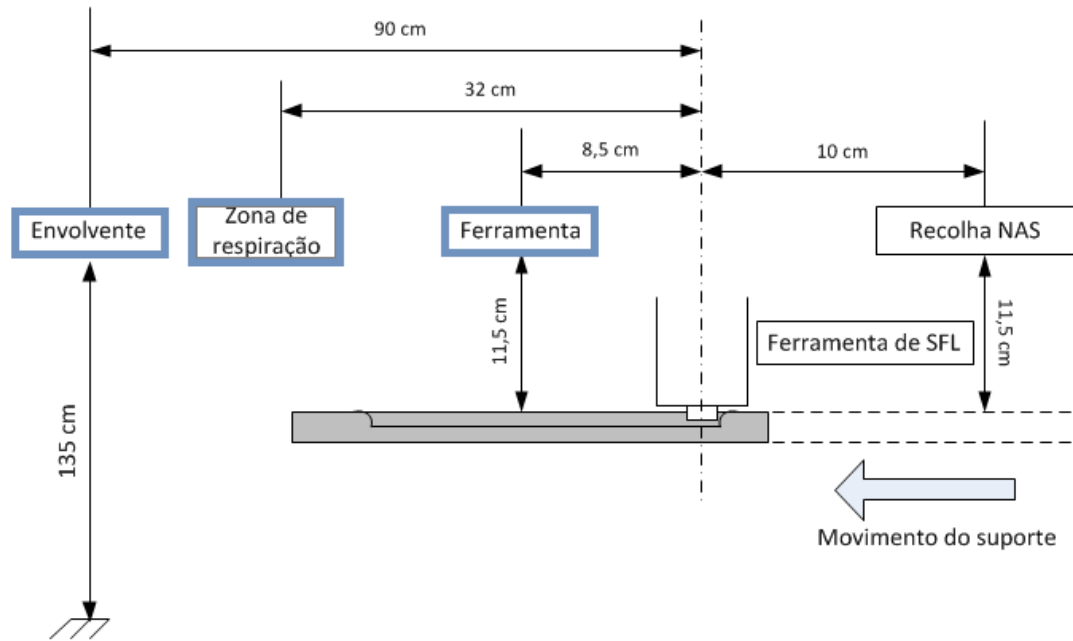


Figura 3.10: Esquema de posicionamento dos pontos de recolha e medição (sem escala)

Os ensaios realizaram-se no Laboratório de Tecnologia Mecânica, do DEMI da FCT/UNL. Os ensaios realizaram-se no período da manhã, de modo a garantir um período de várias horas, sem a existência de trabalhos a decorrer no laboratório, pretendendo-se assim obter um valor mínimo de partículas presentes no ar, minimizando a contaminação dos dados recolhidos. Foi considerado um tempo mínimo variável entre cada ensaio, para permitir uma deposição das partículas do ensaio anterior.

3.7.2 Segunda fase de ensaios

A segunda fase de ensaios foi realizada em dois dias diferentes, sendo o primeiro dia dedicado à recolha de nanopartículas, através do equipamento NAS, e às medições com o equipamento NSAM 3550. O segundo dia foi dedicado às medições de granulometria com o equipamento SMPS 3034.

Para a segunda fase dos ensaios utilizou-se o equipamento LEGIO™ FSW 3U da ESAB presente nos Laboratórios de Tecnologia Mecânica do IST.

A escolha do ponto de recolha, recaiu no ponto mais próximo da ferramenta para o posicionamento dos três equipamentos utilizados, como se pode observar na figura 3.11. A escolha baseou-se no facto de, na primeira fase de ensaios, o mesmo apresentar valores superiores e mais variados em relação aos restantes, como pode ser constatado no capítulo

seguinte, sendo portanto mais fácil relacionar os parâmetros operatórios com as nanopartículas libertadas, identificando assim os parâmetros possivelmente mais prejudiciais para o operador. Os ensaios referentes aos restantes pontos não foram replicados.

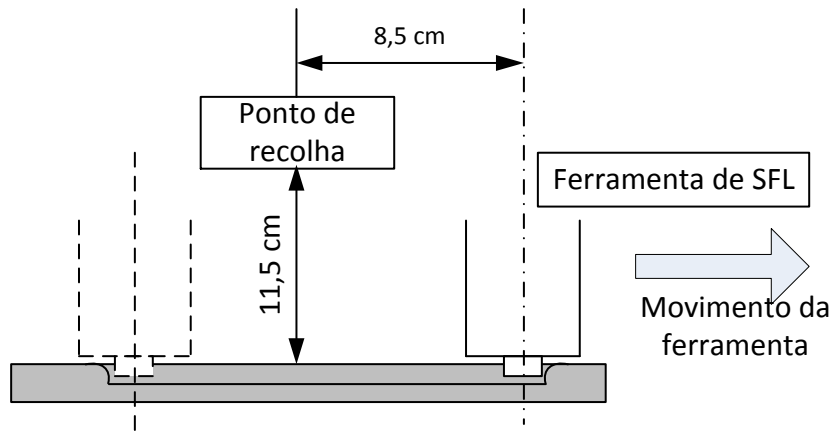


Figura 3.11: Esquema de posicionamento dos pontos de recolha e medição (sem escala)

Para a fixação da grelha de cobre, para análise microscópica, optou-se pela utilização de fita adesiva de carbono, como pode se observar na figura 3.12. No equipamento NAS optou-se por um valor de cerca de -5.7 KV e 2 l/min de caudal.



Figura 3.12: Fixação da grelha de cobre

Para o posicionamento do ponto de recolha, devido às pequenas dimensões do tubo de recolha e devido à necessidade de posicionar os restantes equipamentos, optou-se também por seleccionar um ponto único para fixação, como se pode observar na figura 3.13. Posicionou-se este ponto, a uma distância de 15 cm, a metade do curso de soldadura, e à altura igual à do sistema de fixação

de soldadura por fricção linear. As partículas recolhidas neste ensaio foram enviadas para o CEMUC, para observação microscópica em TEM. Através deste equipamento efectuou-se uma recolha constante para cada liga de alumínio utilizada, procedendo-se à mudança da grelha de cobre aquando da mudança da liga de alumínio.

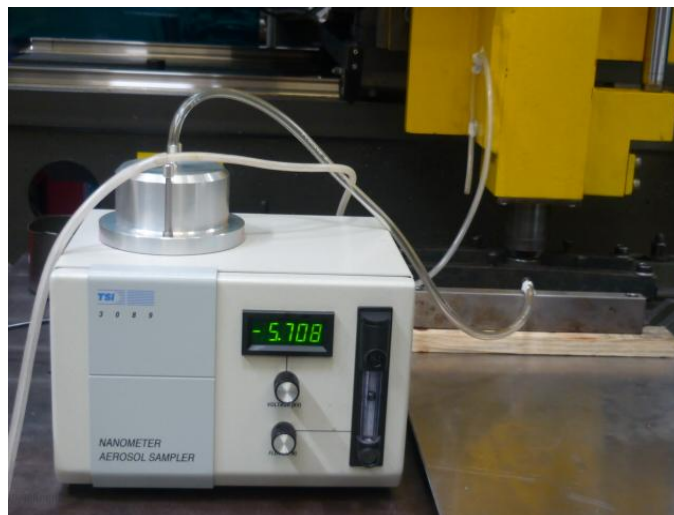


Figura 3.13: Fixação NAS na segunda fase de ensaios

Procedeu-se também a mais uma série de réplicas dos ensaios realizados para as várias velocidades de rotação, com a finalidade de recolher uma maior quantidade de partículas para análise TEM e EDS, no microscópio presente nas instalações do *MicroLab* (ICEM/IST). Para estas medições foi escolhido um ponto semelhante ao usado para as medições através do NSAM 3550, com as distâncias representadas na figura 3.11. Igualmente aos casos anteriores, procedeu-se à utilização de uma grelha de recolha para cada material soldado.

O posicionamento do ponto de medição do equipamento SMPS 3034 pode ser observado na figura 3.11. Sabe-se que o equipamento requer um tempo de aquisição de 180 segundos para efectuar as contagens referentes a 63 dimensões diferentes de diâmetro das nanopartículas (compreendidos entre os 10 e 487 nm). Além disto, as contagens são medidas de forma contínua e crescente, tendo em conta o sistema de fixação, que não permite a realização de soldaduras de dimensões superiores a 265 mm. Uma vez que, uma velocidade de avanço de 150 mm/min corresponde a 106 s, optou-se por realizar várias medições para os mesmos parâmetros de soldadura, de modo a abranger todos os diâmetros medidos. Realizando-se assim uma soldadura durante os primeiros 105 segundos de medição, obteve-se o número de partículas para as dimensões inferiores, e realizando-se numa nova medição, ou seja, uma soldadura na segunda metade do tempo de medição, obteve-se o número de partículas para as dimensões superiores. Deste modo o número de partículas por cada valor de diâmetro pôde ser medido, combinando ambas as medições.

3.8 Conclusão

O procedimento experimental desenvolvido permitiu avaliar de forma científica e rigorosa a deposição de partículas na zona alveolar dos operadores. Permitiu também uma caracterização das nanopartículas provenientes da soldadura por fricção linear e a dissipação das nanopartículas ao longo do espaço.

O procedimento adoptado permitiu relacionar as emissões com os principais parâmetros operatórios, nomeadamente com a relação Ω/V .

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na experimentação efectuada.

Inicialmente apresentam-se os resultados referentes à primeira fase experimental, onde se discutem as metodologias e os seus impactos nos resultados, bem como a relação entre os resultados e os parâmetros de processo envolvidos. Posteriormente, justifica-se a realização e são apresentados os resultados referentes à segunda fase de ensaios, com uma comparação mais minuciosa em relação aos parâmetros de processo envolvidos. A apresentação dos resultados é acompanhada por gráficos, com as medições efectuadas, ou os seus valores médios, com uma discussão crítica dos mesmos.

4.2 Primeira fase de ensaios

Como referido no capítulo anterior, antes de cada medição através do NSAM 3550 para cada caso em estudo, foram efectuadas medições no respectivo ponto de recolha, antes de iniciar a soldadura por fricção linear. Tendo em conta que o equipamento se encontrava configurado para obter valores com um intervalo de 10 segundos, realizou-se uma média aritmética dos mesmos, de modo a caracterizar o valor médio das partículas presentes no ambiente. Este valor foi, posteriormente, subtraído aos valores obtidos, em cada medição, em cada instante, aquando da realização das soldaduras.

A decisão de efectuar este tipo de subtracção foi considerada e aplicada com o objectivo de isolar os valores referentes ao processo, dos valores que estariam presentes naturalmente no ambiente de trabalho, ou dos valores referentes às soldaduras precedentes. Foi tomada também em consideração, a possível existência de valores inferiores durante os ensaios de soldadura, comparativamente àqueles encontrados no ambiente normal do laboratório. Para evitar a presença de valores negativos, optou-se por considerar como nulos quaisquer valores negativos. Com o intuito de permitir uma análise dos valores absolutos, os mesmos são apresentados em anexo.

Os dados obtidos na primeira fase experimental, para cada um dos casos e para cada uma das distâncias, encontram-se representados graficamente no seguinte capítulo. Devido ao elevado número de ensaios realizados, optou-se por apresentar gráficos comparativos entre os parâmetros do processo alterados, de modo a permitir uma visualização mais fácil das tendências e das variações, consoante as opções tomadas em ambiente de trabalho.

4.2.1 Liga AA 5083-O

Como se pode observar na figura 4.1, e como seria de esperar, a quantidade de partículas libertadas pela soldadura por fricção linear, com capacidade de deposição na zona alveolar no pulmão humano, apresenta valores superiores quando a sonda de recolha de partículas se encontra na posição mais próxima do local onde a ferramenta de SFL opera. Pode-se observar também que, entre a zona de respiração do operador e a zona envolvente, os valores apresentados são muito reduzidos face a esta, sendo estes valores mais próximos dos apresentados sem a realização da soldadura. Na figura 4.2, pode observar-se a representação gráfica correspondente, que permite uma melhor percepção das diferenças entre a zona de respiração do operador e a zona envolvente.

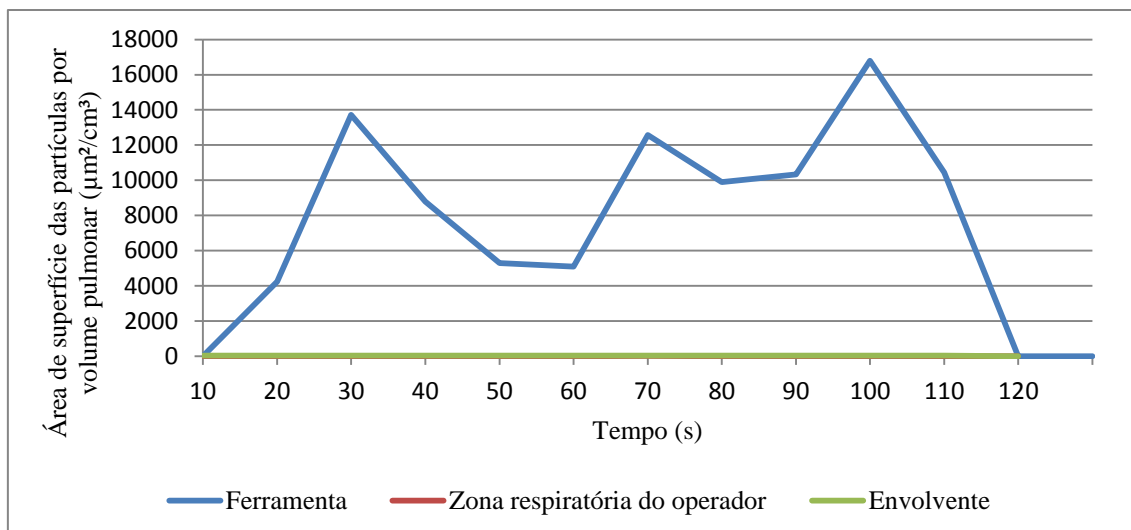


Figura 4.1: Medição para todos os pontos a 450 rev/min

Na figura 4.1, observou-se que o valor mais elevado registado foi de cerca de 17000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, obtido no ponto referente à ferramenta. A representação gráfica apresentou valores pouco constantes na ferramenta, o que não permitiu criar uma relação directa com os parâmetros do processo de soldadura por fricção linear.

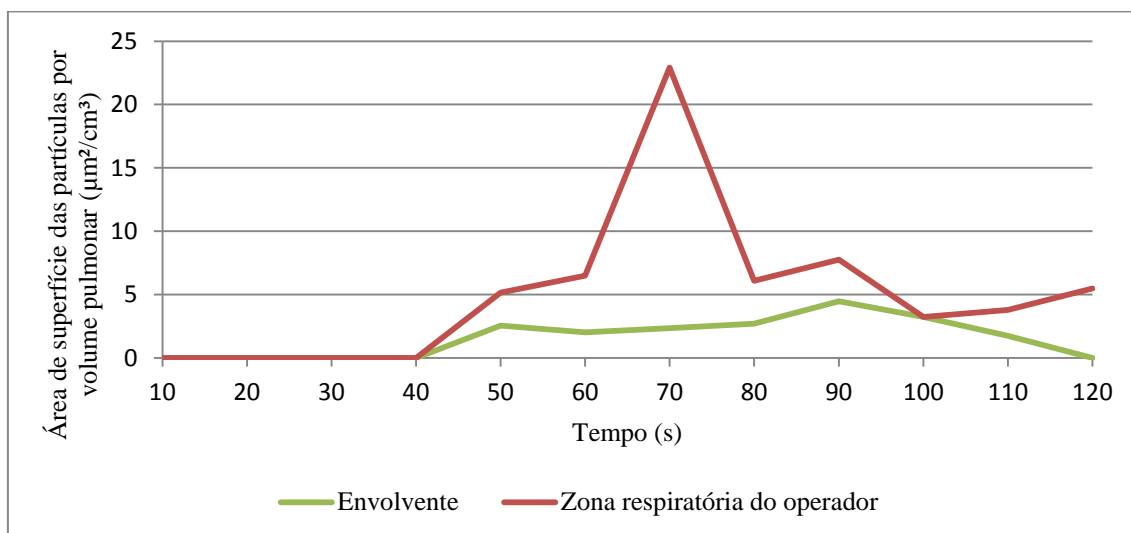


Figura 4.2: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 450 rev/min

Na figura 4.2, como esperado, verifica-se que a zona respiratória do operador apresentou valores superiores aos obtidos na zona envolvente. Observa-se também que, na maior parte dos pontos os valores foram próximos entre si, e também próximos dos medidos no ambiente do laboratório.

Na figura 4.3 pode observar-se também valores muito superiores de nanopartículas com capacidade para deposição na zona alveolar, quando a recolha foi efectuada no local mais próximo da ferramenta de soldadura por fricção linear. Resultados idênticos foram observados na figura 4.1.

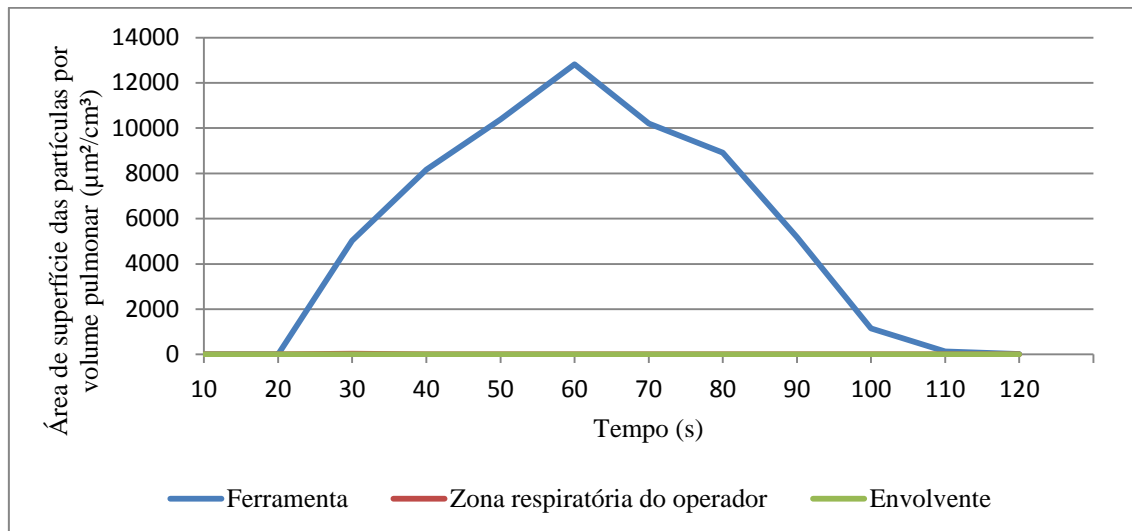


Figura 4.3: Medição para todos os pontos a 1120 rev/min

O valor máximo foi atingido aos 60 s e foi de cerca de $13000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Entre a zona de respiração do operador e a zona envolvente, os valores apresentados foram muito reduzidos, face ao ponto referente à ferramenta. Observaram-se valores mais próximos dos apresentados, sem a realização da soldadura. Para uma melhor percepção das diferenças entre a zona de respiração do operador e a envolvente pode-se observar na figura 4.4 a representação gráfica correspondente.

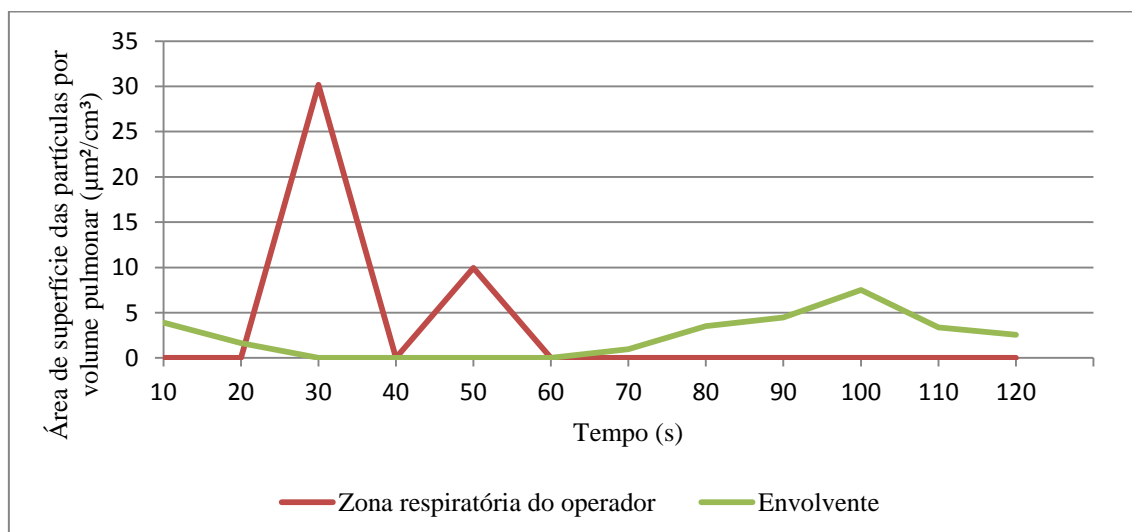


Figura 4.4: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 1120 rev/min

Os valores apresentados para a zona respiratória apresentaram valores máximos superiores aos medidos na zona envolvente. Observou-se ainda que existem vários pontos em que a zona envolvente apresentou valores superiores. Contudo, através de uma análise dos valores absolutos, o número de pontos onde tal acontece foi reduzido. Os respectivos valores podem ser consultados em anexo.

Tendo em conta os vários locais de medição e os resultados obtidos nos mesmos, optou-se por avaliar a relação entre as nanopartículas libertadas e os parâmetros de soldadura, no ponto referente à ferramenta. Na figura 4.5 encontra-se representado um gráfico comparativo entre os casos escolhidos.

Relativamente aos valores máximos medidos, a soldadura realizada com uma velocidade de rotação de 450 rev/min apresentou um valor de cerca de 17000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 100 segundos de medição. A soldadura realizada com 1120 rev/min apresentou um valor máximo de cerca de 13000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ aos 60 segundos. Relativamente ao perfil das linhas obtidas, para a linha das medições a 450 rev/min não se observou uma tendência óbvia nos valores, apresentando dois valores mínimos e máximos relativos os quais não é possível relacionar com qualquer ocorrência durante os ensaios. A linha referente à medição com 1120 rev/min apresentou um valor máximo de cerca de 13000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 60 s, sendo os valores crescentes até este ponto e decrescentes deste ponto em diante.

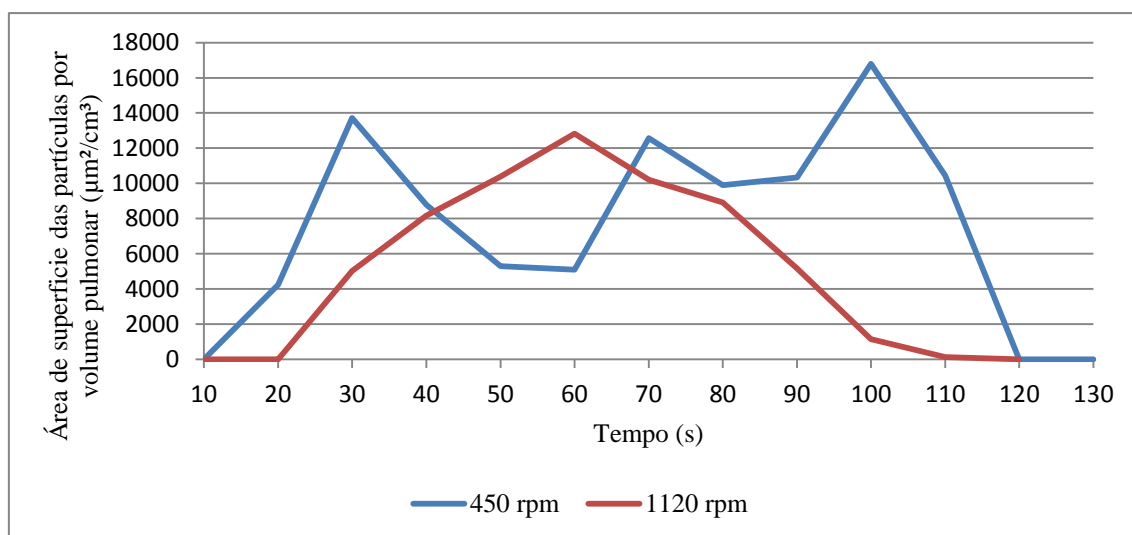


Figura 4.5: Medição na ferramenta para 450 rev/min e 1120 rev/min

Os valores apresentados até este momento referem-se às medições em tempo real, efectuadas pelo equipamento utilizado. Estas medições tiveram como objectivo demonstrar a existência de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar, e permitir uma compreensão das mesmas ao longo da evolução do processo de soldadura por fricção linear.

O perfil das linhas obtidas, através do equipamento, não permite uma análise sucinta sobre as circunstâncias mais prejudiciais para os operadores, devido à variação dos valores obtidos. Como tal, na tabela 4.1, estão representados os valores médios para todos os casos.

Analisando a tabela 4.1 pode observar-se que o caso mais preocupante diz respeito às emissões medidas no ponto mais próximo da ferramenta, a uma velocidade de 450 rev/min. Pode verificar-se também uma diminuição acentuada dos valores medidos com o aumento da distância do ponto de medição, tal como seria de esperar. Contrariamente ao previsto, e ao verificado noutros estudos, uma soldadura a uma velocidade de rotação mais alta apresenta valores médios inferiores àqueles medidos para uma velocidade mais baixa. Apenas para o ponto referente à zona envolvente, é que se verifica o que seria de esperar, isto é, maiores valores medidos, para maiores velocidades de rotação [2].

Tabela 4.1: Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar para a liga AA5083

	Ferramenta		Zona respiratória do operador		Envolvente	
	450	1120	450	1120	450	1120
Velocidade de rotação	rev/min	rev/min	rev/min	rev/min	rev/min	rev/min
Média						
($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)	5282,10	5166,16	5,08	3,34	1,59	2,33

4.2.2 Liga AA 6082-T6

Os valores apresentados, na medição efectuada no ponto mais próximo da ferramenta de soldadura por fricção linear, são bastante superiores aos apresentados nos restantes pontos, como se pode observar na figura 4.6. Tal como se observou na liga AA 5083, para os mesmos parâmetros, os valores referentes à zona respiratória do operador e à zona envolvente apresentaram valores mais próximos dos medidos no ambiente laboratorial, do que aqueles medidos no ponto referente à ferramenta. Devido às diferentes ordens de grandeza de valores medidos, tornou-se necessário efectuar uma representação gráfica de ambos os pontos em separado, conforme a figura 4.7.

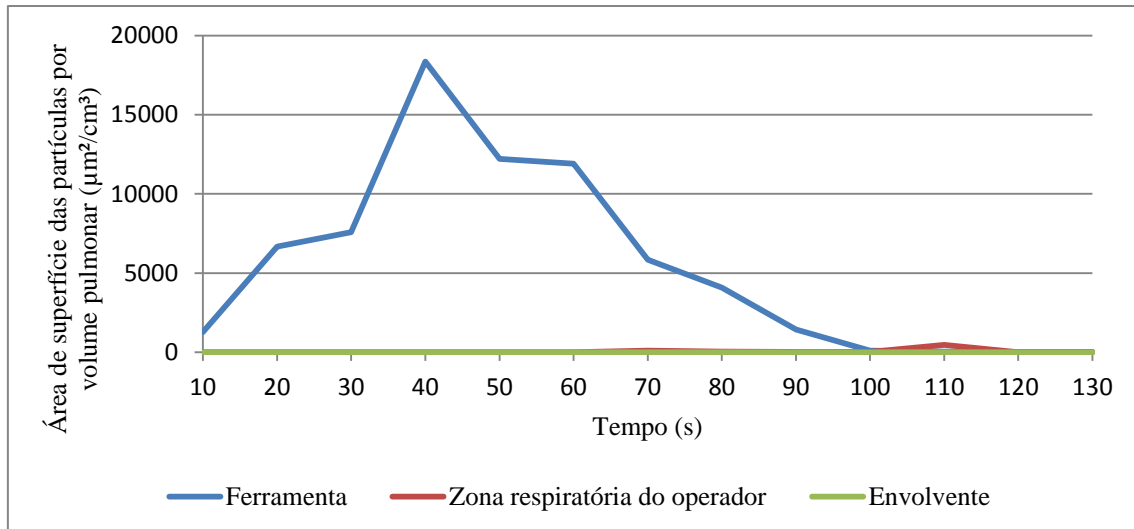


Figura 4.6: Medição para todos os pontos a 450 rev/min

Na figura 4.6 pode-se observar um valor máximo de cerca de $18000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 40 segundos, referente à ferramenta. Os valores medidos antes deste valor máximo são sempre crescentes, e posteriormente decrescentes, não existindo máximos relativos nestas medições.

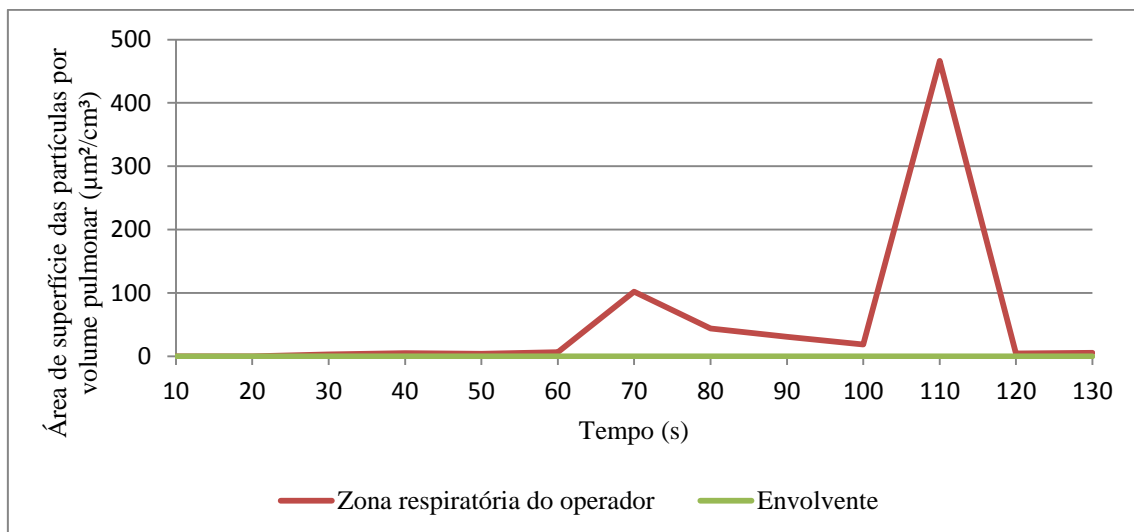


Figura 4.7: Medição para a zona respiratória do operador e para a envolvente a 450 rev/min

Na figura 4.7, devido à decisão tomada relativamente à subtracção do valor médio medido no ambiente, imediatamente antes da realização dos ensaios, os valores apresentados para a envolvente assumem, todos, um valor nulo. Os valores medidos na zona respiratória do operador são superiores, e diferentes de zero, assumindo o valor máximo de aproximadamente $450 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 110 segundos. Pode também observar-se um máximo relativo aos 70 segundos. Os valores correspondentes, sem a subtracção dos valores médios do ambiente, em ambos os casos, podem ser consultados em anexo.

Na figura 4.8 pode-se observar os valores obtidos na soldadura realizada com uma velocidade de 1120 rev/min. Tal como em todos os casos anteriores, verifica-se que existiu uma diferença na ordem de grandeza, entre os valores medidos na ferramenta e os restantes pontos, o que exige a sua representação num gráfico distinto figura 4.9.

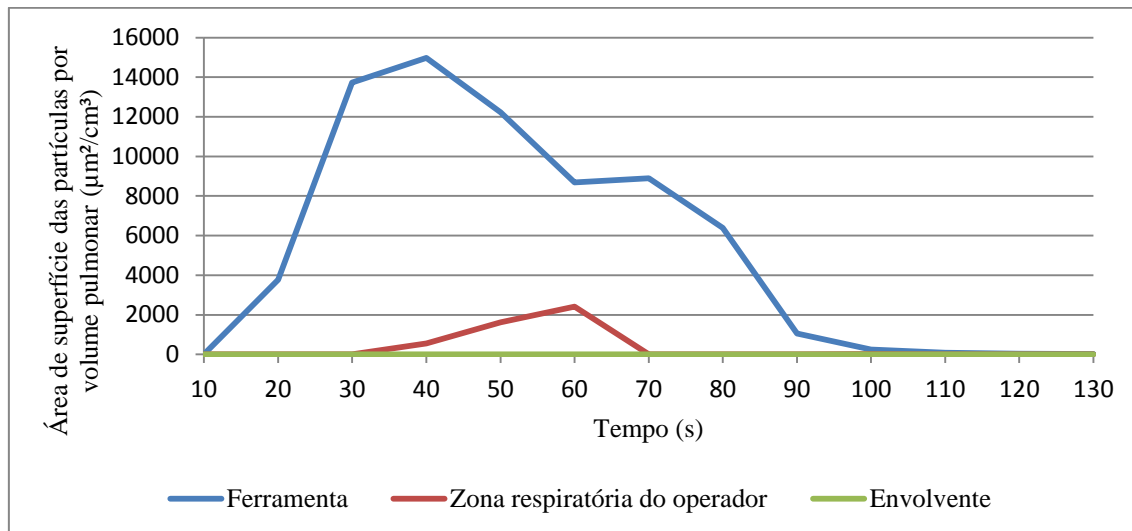


Figura 4.8: Medição para todos os pontos a 1120 rev/min

Na figura 4.8 pode observar-se um valor máximo, de aproximadamente 13000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 40 segundos, na linha referente ao ponto da ferramenta. Pode ainda observar-se um ponto máximo de cerca de 2400 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 60 s, referente à zona de respiração do operador.

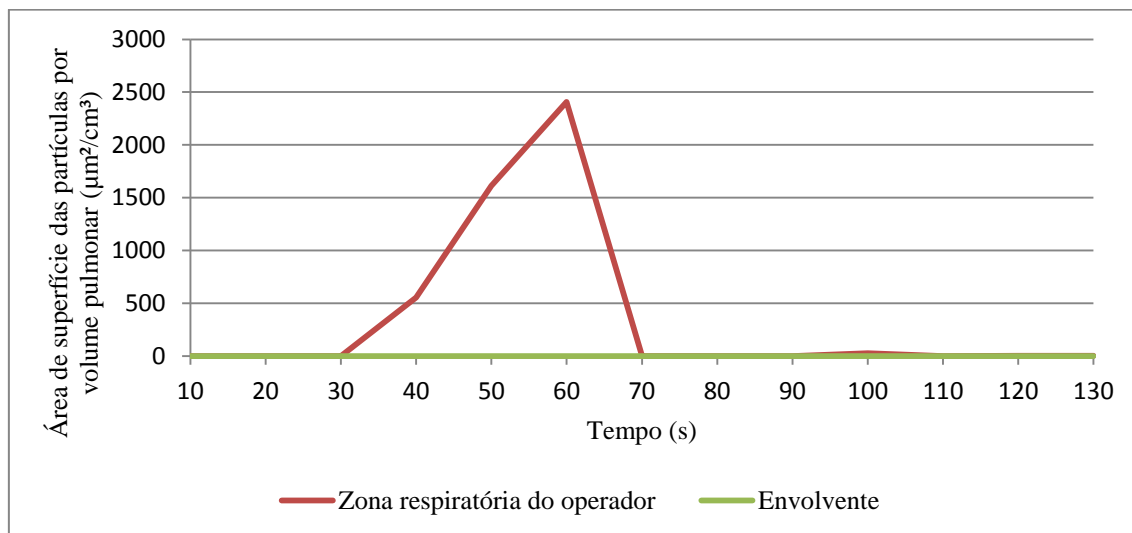


Figura 4.9: Medição para a zona respiratória do operador e para a envoltório a 1120 rev/min

Na figura 4.9, devido à decisão tomada relativamente à subtração do valor médio medido no ambiente imediatamente antes da realização dos ensaios, verifica-se que os valores apresentados

para a zona envolvente são todos nulos. Os valores medidos na zona respiratória do operador são superiores, apesar de existirem valores também nulos, assumindo o valor máximo, um valor de aproximadamente $2400 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, aos 60 s. Os valores correspondentes a ambos os casos, sem a subtração do valor médio do ambiente, podem ser consultados em anexo.

Na figura 4.10 pode observar-se as medições referentes ao ponto correspondente à ferramenta, para os diferentes parâmetros de soldadura, definidos no procedimento experimental. Pode observar-se que o valor máximo se encontra na soldadura a 450 rev/min, e tal ocorreu aos 40 segundos, com um valor de cerca de $18000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. É Importante também referir que para a soldadura a 1120 rev/min, o valor máximo foi atingido no mesmo instante, $15000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Pode também verificar-se, que os gráficos dos dois casos apresentam perfis muito semelhantes.

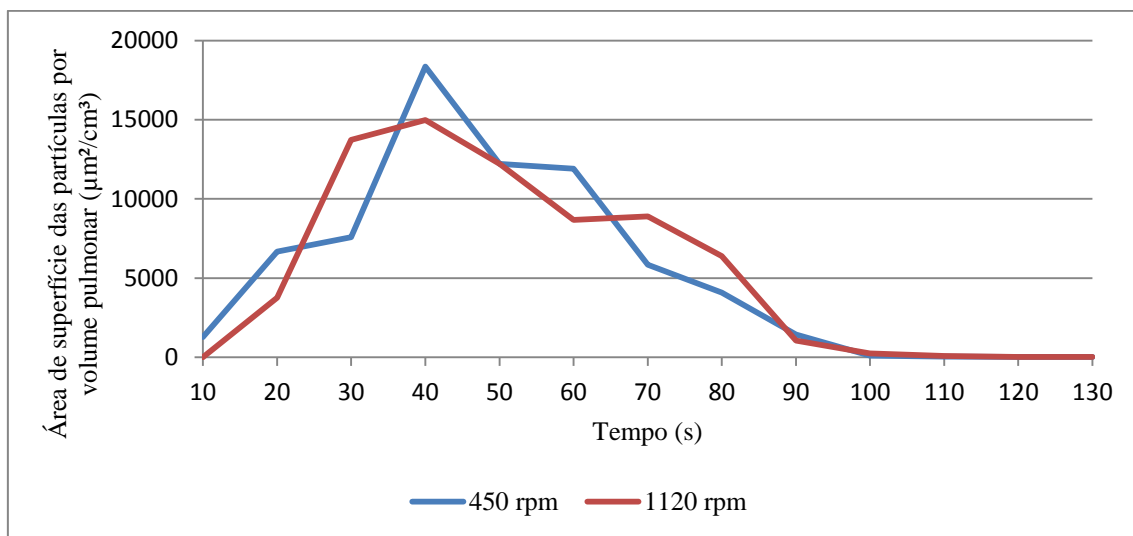


Figura 4.10: Medições na ferramenta para 450 rev/min e 1120 rev/min

Analogamente ao efectuado para a liga AA 5083, para a liga AA 6082 calcularam-se as médias dos valores representados graficamente, de modo a poder avaliar os casos mais prejudiciais.

Na tabela 4.2, pode verificar-se que o valor médio mais elevado corresponde aos valores no ponto referente à ferramenta, para uma velocidade de rotação de 1120 rev/min. Tal como ocorreu para a liga AA 5083, pode verificar-se uma diminuição acentuada dos valores medidos em cada ponto. Para a liga AA 6082, verificou-se, para todos os pontos, valores médios superiores para velocidades de rotação mais altas, tal como esperado e observado noutros estudos.

Tabela 4.2: Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar para a liga AA 6082

	Ferramenta		Zona respiratória do operador		Envolvente	
Velocidade de rotação	450 rev/min	1120 rev/min	450 rev/min	1120 rev/min	450 rev/min	1120 rev/min
Média ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)	5354,14	5393,19	53,27	355,24	0	0,25

4.2.3 Comparação entre diferentes ligas de alumínio

Tendo em conta os resultados apresentados anteriormente, e os casos em estudo, revelou-se interessante e pertinente comparar as diferenças entre, as emissões com capacidade de deposição na zona alveolar de pulmão, e relacionar os parâmetros semelhantes para as diferentes ligas de alumínio utilizadas. Na figura 4.11, pode-se observar a comparação entre as duas ligas, com soldadura a 450 rev/min e na figura 4.12 a soldadura a 1120 rev/min.

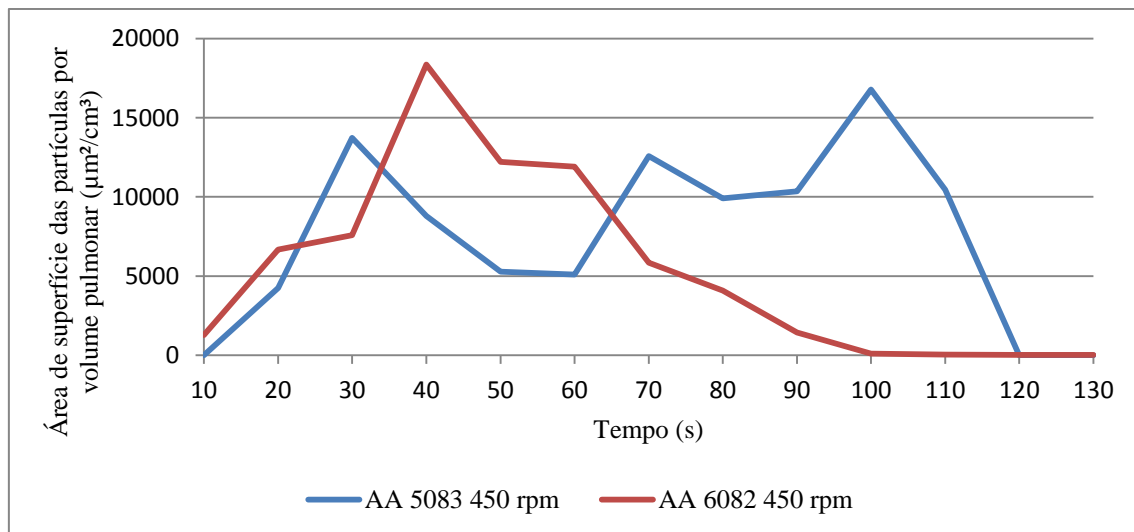


Figura 4.11: Medições na ferramenta a 450 rev/min para ambas as ligas

Na figura 4.11 podem observar-se perfis bastante diferentes. Verifica-se também, que os valores máximos, para cada um dos casos, são bastante próximos, apresentando entre eles uma diferença de $1500 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, sendo o valor superior referente à liga AA 6082.

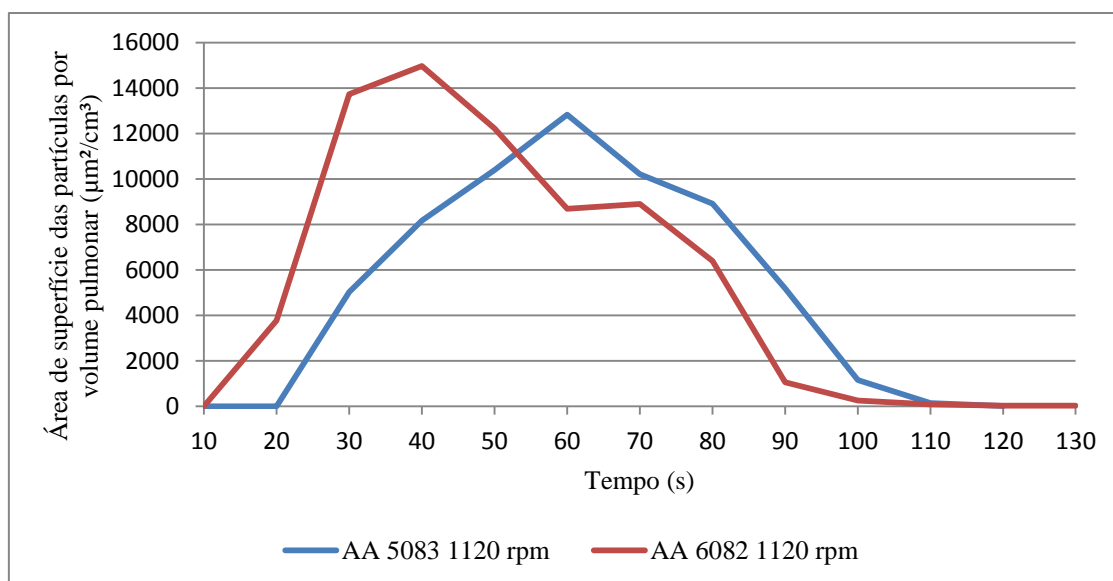


Figura 4.12: Medições na ferramenta a 1120 rev/min para ambas as ligas

Na figura 4.12 podem observar-se perfis com algumas semelhanças. Pode também observar-se que os valores máximos, para cada um dos casos, são bastante próximos, apresentando entre eles uma diferença de $2000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, onde se verifica mais uma vez o valor superior referente à liga AA 6082.

Para uma melhor comparação, na tabela 4.3 podem ver-se representados os valores médios dos gráficos apresentados. Observa-se que os valores medidos são superiores para a liga AA 6082, comparativamente aos medidos para a liga AA 5083.

Tabela 4.3: Valores médios medidos no ponto referente à ferramenta para diferentes ligas e velocidades

Ω	450 rev/min		1120 rev/min	
Liga de alumínio	AA 5083	AA 6082	AA 5083	AA 6082
Média	5282,10	5354,14	5166,16	5393,19
($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)				

4.3 Segunda fase de ensaios

Como se pode verificar, na primeira fase dos ensaios, existem emissões de nanopartículas com capacidade de deposição na região alveolar do pulmão, relacionadas com a soldadura por

fricção linear. A segunda fase de ensaios teve como objectivo verificar os resultados da primeira fase de ensaios, utilizando um equipamento que permite um controlo total sobre todos os parâmetros de soldadura, bem como a sua monitorização. Nesta fase de ensaios, para além de serem avaliados os impactos nos operadores, é feita também uma caracterização das emissões e das nanopartículas que as constituem, nomeadamente a nível químico e morfológico.

Na segunda fase de ensaios, procedeu-se de forma semelhante à primeira fase, em relação à subtracção dos valores do ambiente laboratorial. Antes de cada medição, com o equipamento NSAM 3550, para cada caso em estudo, foram efectuadas medições no ponto de recolha em causa, antes de se iniciar a soldadura por fricção linear. Tendo em conta que o equipamento se encontrava configurado para obter valores com um intervalo de 10 segundos, decidiu-se realizar uma média aritmética dos mesmos, de modo a caracterizar o valor médio de partículas presentes no ambiente, e posteriormente subtrair, esse valor aos valores obtidos em cada instante, de cada medição, durante a realização das soldaduras.

Para as medições de granulometria efectuadas com o equipamento SMPS 3034, tendo em conta a abordagem realizada no procedimento experimental, optou-se por combinar cada ensaio realizado para cada caso do seguinte modo: para cada ensaio, seleccionou-se o valor máximo da contagem de nanopartículas, tendo em conta cada valor de diâmetro representou-se graficamente os valores obtidos. Deste modo, apenas com uma representação gráfica, é apresentado o número de nanopartículas por diâmetro, para toda a gama de valores.

Após a recolha de nanopartículas, procedeu-se à observação das grelhas de cobre, através de dois microscópios electrónicos de transmissão distintos. Procedeu-se a uma análise morfológica, com o microscópio FEI-Tecnaí, Modelo G2 S20. A análise morfológica e química realizou-se com o microscópio Hitachi, Modelo H-8100 II.

Através da realização dos ensaios, no equipamento LEGIO™ FSW 3U, foi possível gravar todos os parâmetros do processo, através de um *software* específico. Para uma mais fácil representação, foi efectuada a média aritmética, para todos os parâmetros, entre todas as réplicas. Na figura 4.13 podem observar-se os parâmetros referentes à velocidade de avanço, força vertical, posição vertical, e velocidade de rotação, para os Casos 1 e 2.

Pode observar-se que, para o Caso 2, se verificou um aumento na velocidade de avanço inicial, superior aos 15 cm/min, definidos para este caso. Outro parâmetro que variou entre os dois casos foi a força vertical utilizada. Tal deveu-se à dificuldade de se efectuar soldaduras aceitáveis, com o mesmo valor deste parâmetro, em ambos os casos. No Caso 1, registou-se um valor de 665 N, durante o avanço da ferramenta, enquanto no Caso 2 se verificou um valor de 500 N.

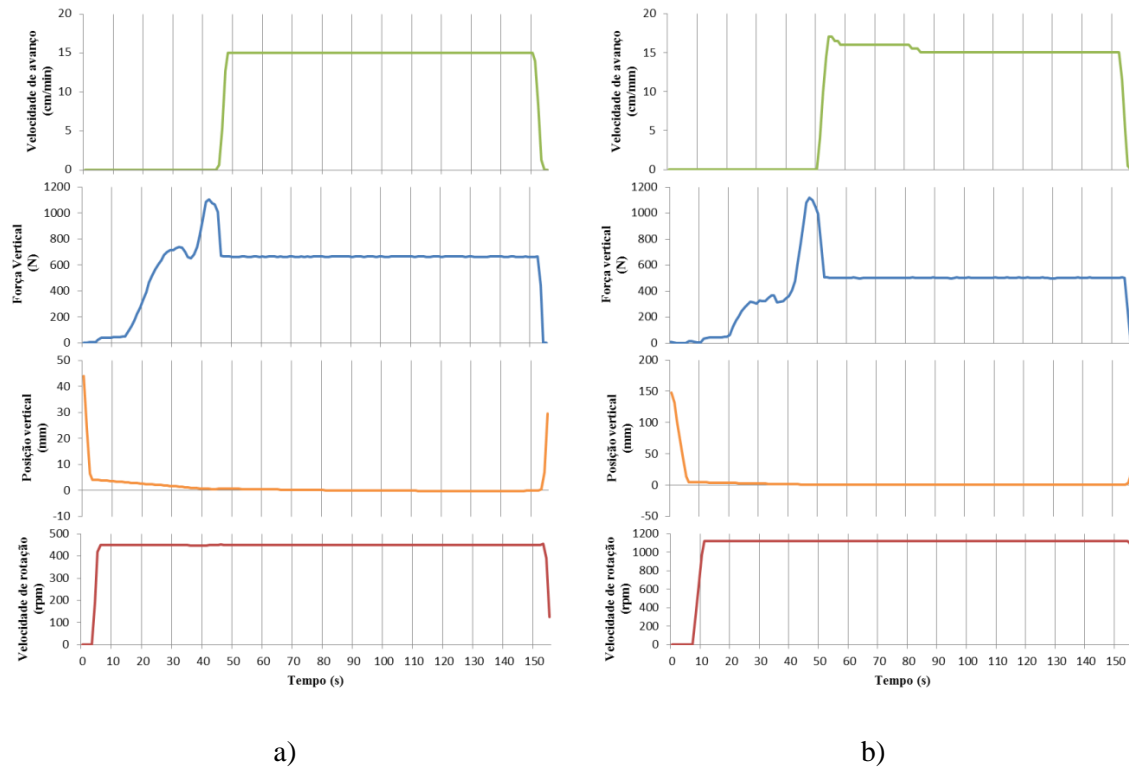


Figura 4.13: Parâmetros de soldadura reais para a liga AA 5083, a) Caso 1 e b) Caso 2

Na figura 4.14, pode observar-se que os valores apresentados correspondem aos definidos no procedimento experimental, e que, para os valores de força vertical, existem diferenças entre os dois casos, tal como se verificou anteriormente para os Casos 1 e 2. Para o Caso 3, a força vertical utilizada foi de 830 N, e no Caso 4 foi de 600 N.

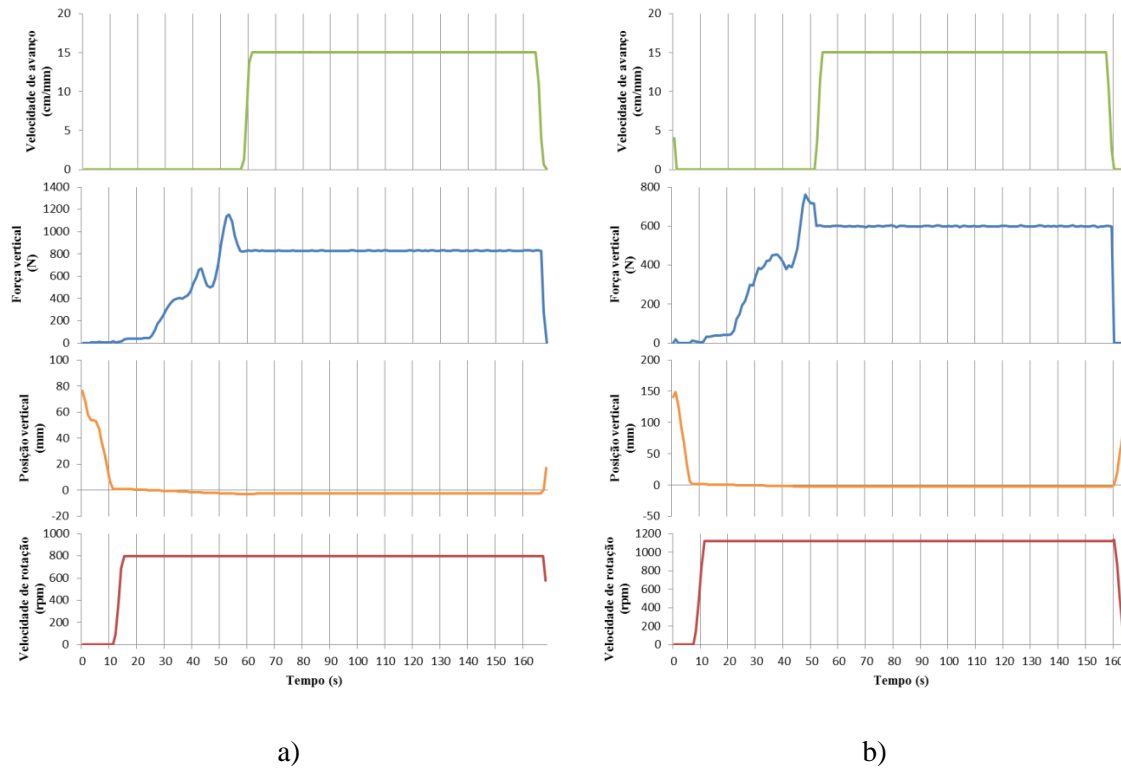


Figura 4.14: Parâmetros de soldadura reais para a liga AA 6082, a) Caso 3 e b) Caso 4

4.3.1 Resultados de deposição alveolar

Na figura 4.15 podem observar-se os resultados referentes ao ensaio e às réplicas realizados para a soldadura, com uma velocidade de rotação de 450 rev/min. Os valores das várias medições são bastante variados, apresentando um valor máximo de aproximadamente $11500 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ na réplica 3, e um valor mínimo de cerca de $250 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ na réplica 1. Apesar de se obterem valores máximos e mínimos tão díspares, tendo em conta o perfil que representa cada ensaio, pode-se afirmar que as mesmas obedecem a uma tendência, e que um valor médio das mesmas poderá ser tomado como representativo das emissões para a liga AA 5083, a 450 rev/min.

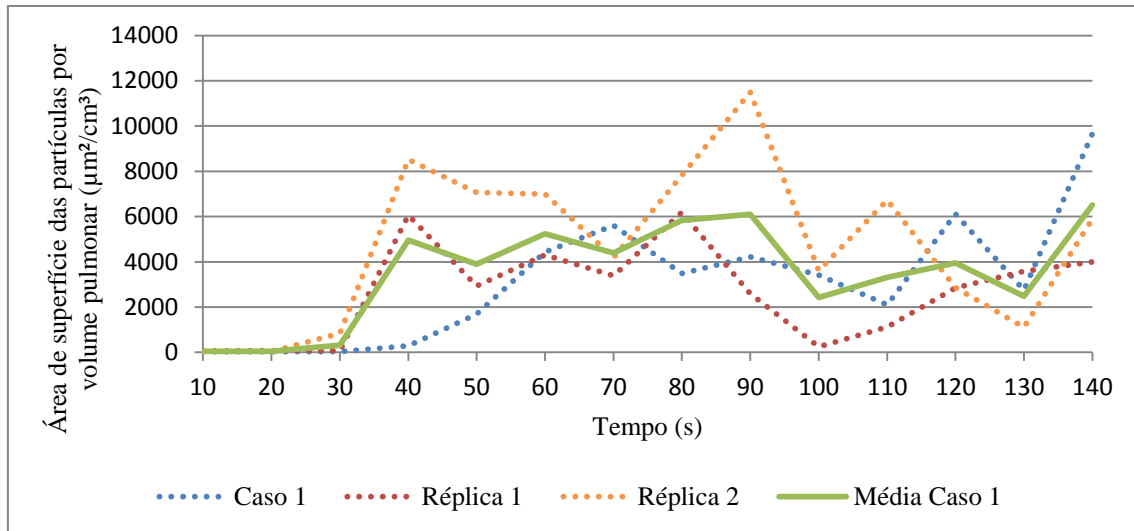


Figura 4.15: Medições NSAM para AA 5083 a 450 rev/min

Na figura 4.16, podem observar-se as medições referentes à velocidade de rotação de 1120 rev/min, para o ensaio e para a réplica. Verifica-se que os valores máximos atingidos são de cerca de $46400 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ e $44200 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, respectivamente, com um desfaseamento de 10 segundos. Verifica-se também que os valores da réplica são menores em quase todos os pontos. Ambas as medições apresentam um perfil semelhante, crescente até ao seu ponto máximo e com os valores entre os mesmos bastante próximos. Pode-se então afirmar que a linha dos valores médios representa correctamente o Caso 2.

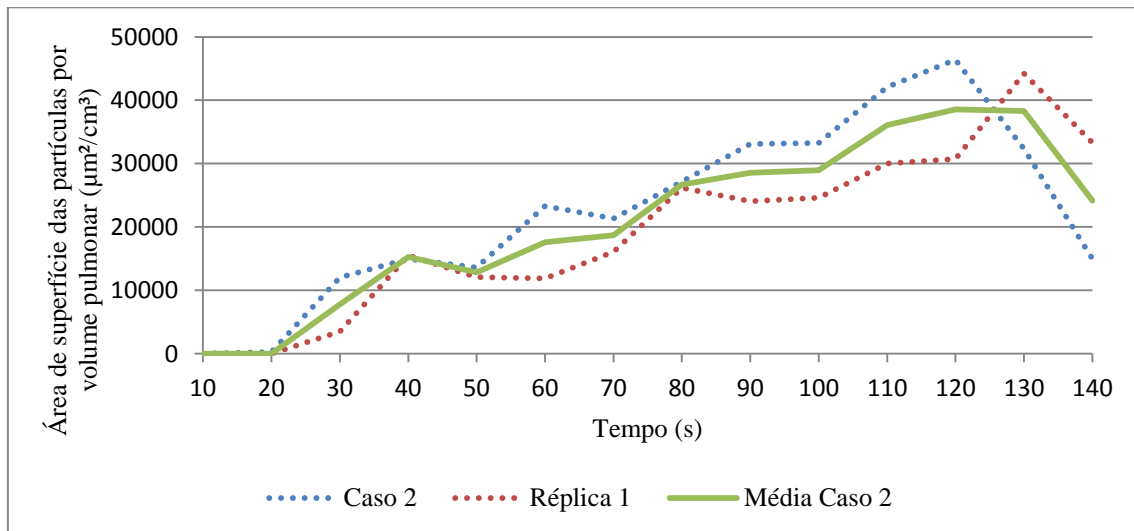


Figura 4.16: Medições NSAM para AA 5083 a 1120 rev/min

Na figura 4.17 podem observar-se as medições referentes à velocidade de rotação de 800 rev/min, para o ensaio e para as réplicas. Observa-se que os valores das várias medições são bastante variados, tendo um valor máximo de aproximadamente $12500 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ na réplica 1, e

um valor mínimo de cerca de $1600 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ na primeira medição. Apesar de os valores máximos e mínimos serem muito díspares, tendo em conta o perfil que representa cada ensaio, pode-se afirmar que as mesmas obedecem a uma tendência, e ainda que, o valor médio das mesmas poderá ser tomado como representação das emissões para o Caso 3.

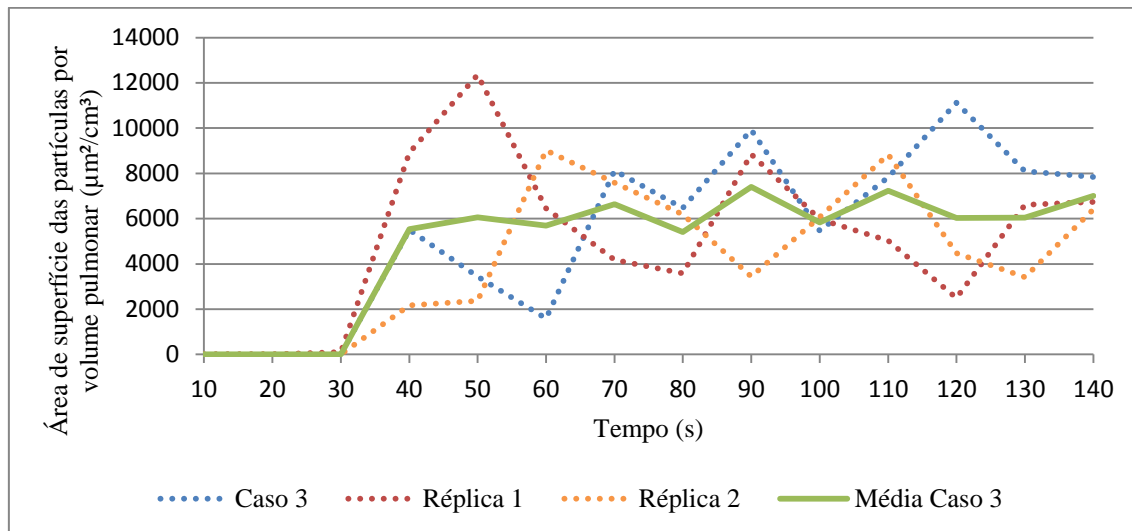


Figura 4.17: Medições NSAM para AA 6082 a 800 rev/min

Na figura 4.18, podem observar-se as medições referentes à velocidade de rotação de 1120 rev/min, para o ensaio e para a réplica. Pode observar-se que os valores máximos atingidos são de cerca de $25000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ e $24000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, respectivamente, e que ocorrem com um desfasamento de 30 segundos. Ambas as medições apresentam um perfil semelhante, e com valores entre os mesmos bastante próximos. Pode-se então afirmar que a linha dos valores médios representa correctamente o Caso 2.

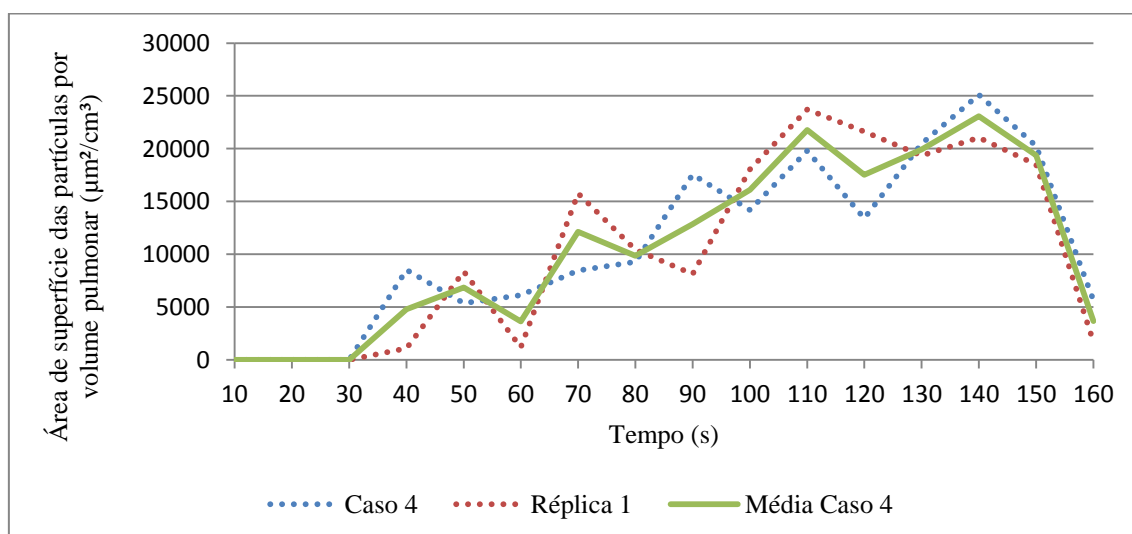


Figura 4.18: Medições NSAM para AA 6082 a 1120 rev/min

Na figura 4.19, pode observar-se uma representação gráfica dos Casos 1 e Caso 2. Neste gráfico pode-se observar a diferença entre os parâmetros de soldadura para uma mesma liga. Verifica-se que para 1120 rev/min, soldadura considerada mais quente, a área de superfície por volume pulmonar é maior em todos os instantes da medição. Pode-se também observar uma série de valores crescentes na soldadura a 1120 rev/min, enquanto na soldadura a 450 rev/min, os valores obtidos são mais semelhantes entre si.

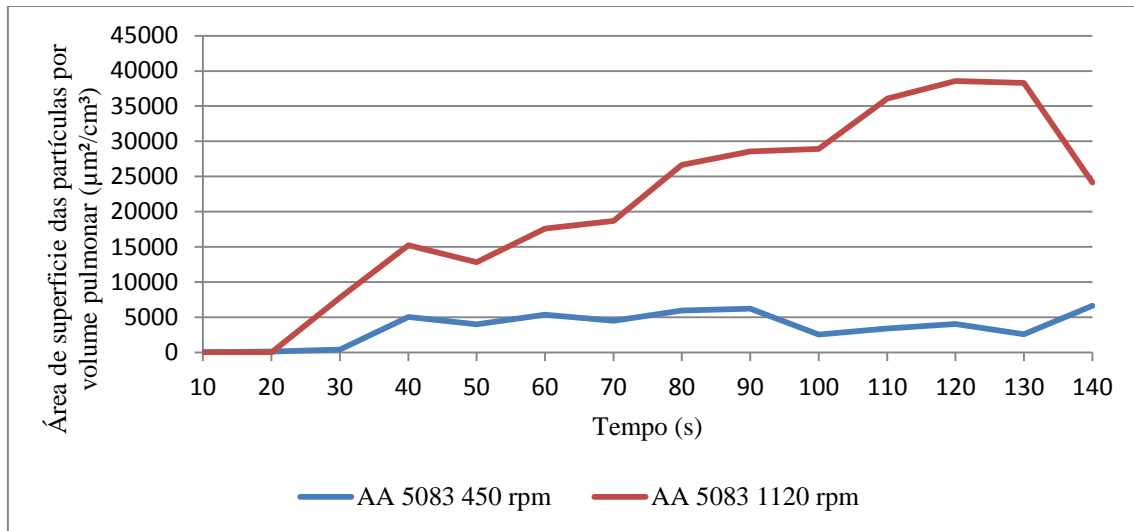


Figura 4.19: Comparação entre as medições na liga AA 5083 para ambas as velocidades de rotação

Na figura 4.20 pode observar-se que a soldadura a 1120 rev/min apresenta valores superiores de área de superfície das nanopartículas por volume pulmonar, para os instantes superiores a 60 segundos de medição. Verifica-se também que os valores da soldadura correspondentes ao Caso 4 são crescentes, apesar de não o serem de forma constante. Os valores medidos no Caso 3, a 800 rev/min apresentam-se próximos entre si.

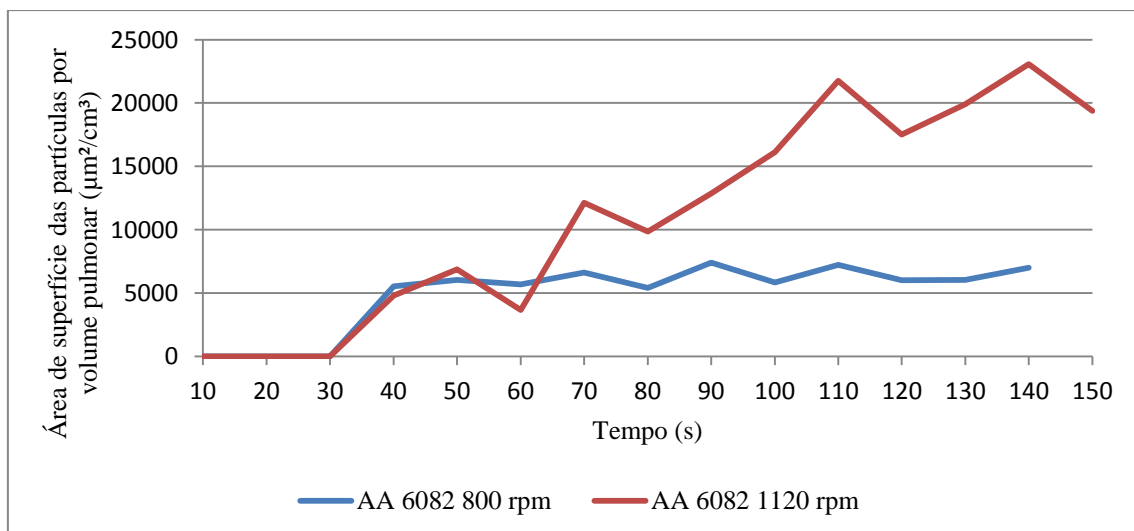


Figura 4.20: Comparação entre as medições na liga AA 6082 para ambas as velocidades de rotação

Na figura 4.21, observa-se a comparação das medições para a mesma velocidade de rotação, a 1120 rev/min. Verifica-se que para a liga AA 5083, as medições são superiores às registadas para a liga AA 6082. Verifica-se também que a distribuição em relação ao tempo é bastante semelhante, e é crescente até atingir o seu valor máximo após o qual se reduz abruptamente.

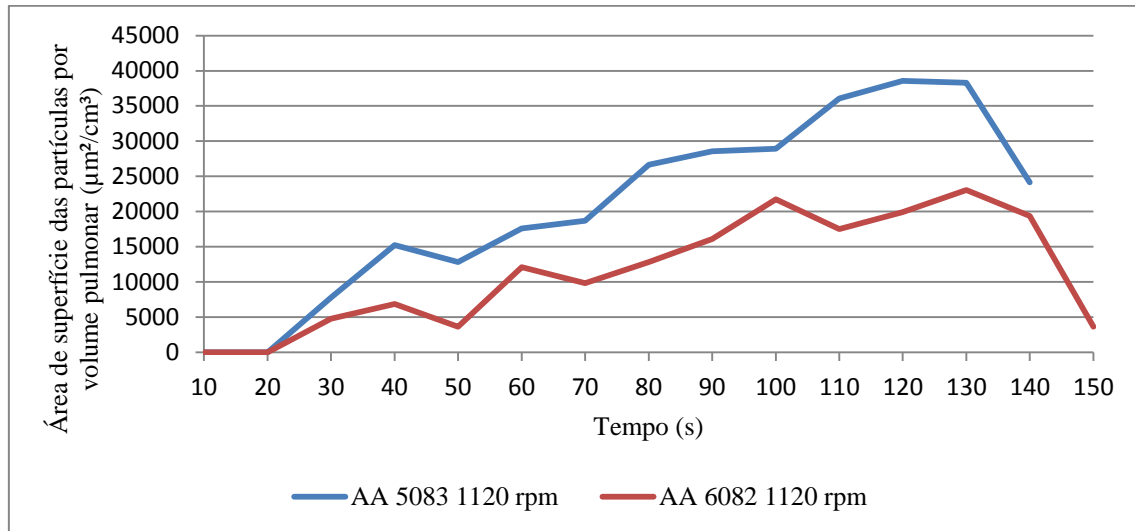


Figura 4.21: Comparação entre as medições à velocidade de rotação de 1120 rev/min para as duas ligas

Na tabela 4.4 podem observar-se os diferentes valores médios, para cada um dos casos. O valor médio mais elevado é o valor referente à soldadura a 1120 rev/min, na liga AA 5083. O valor médio referente à liga AA 6082 é cerca de metade, para a mesma velocidade de rotação, e o valor mais baixo é o valor referente à soldadura realizada a 450 rev/min, na liga AA 5083. Estes resultados são resultados esperados em termos da variação de emissões relativamente ao aumento da velocidade de rotação.

Tabela 4.4: Valores médios para as diferentes ligas e velocidades

Ω	450 rev/min	800 rev/min	1120 rev/min	
Liga de alumínio	AA 5083	AA 6082	AA 5083	AA 6082
Média				
($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)	3536,22	4917,66	20958,43	10725,70

4.3.2 Resultados de granulometria

Na figura 4.22, podem-se observar todas as medições efectuadas através do SMPS 3034. Na tabela 4.5 pode-se observar a relação entre os casos e as amostras efectuadas pelo equipamento. O equipamento efectuou medições de forma contínua, ao longo de todos os ensaios realizados. Os picos presentes no gráfico, representam os momentos em que se efectuaram os diferentes ensaios e réplicas. No eixo vertical encontra-se representada uma escala logarítmica correspondente ao número de partículas medidas. Na escala horizontal encontra-se representado o número da amostra medida, e no eixo da profundidade encontram-se representadas as dimensões das partículas. Atendendo aos dados da tabela 4.5 e da figura 4.22 foi possível confirmar, de forma inequívoca, que a soldadura por fricção linear liberta nanopartículas para o ambiente.

Tabela 4.5: Relação entre casos e amostras medidas através do SMPS 3034

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 3
Medição nº:	7; 11; 12	19; 20; 21	34; 39	57; 58; 61

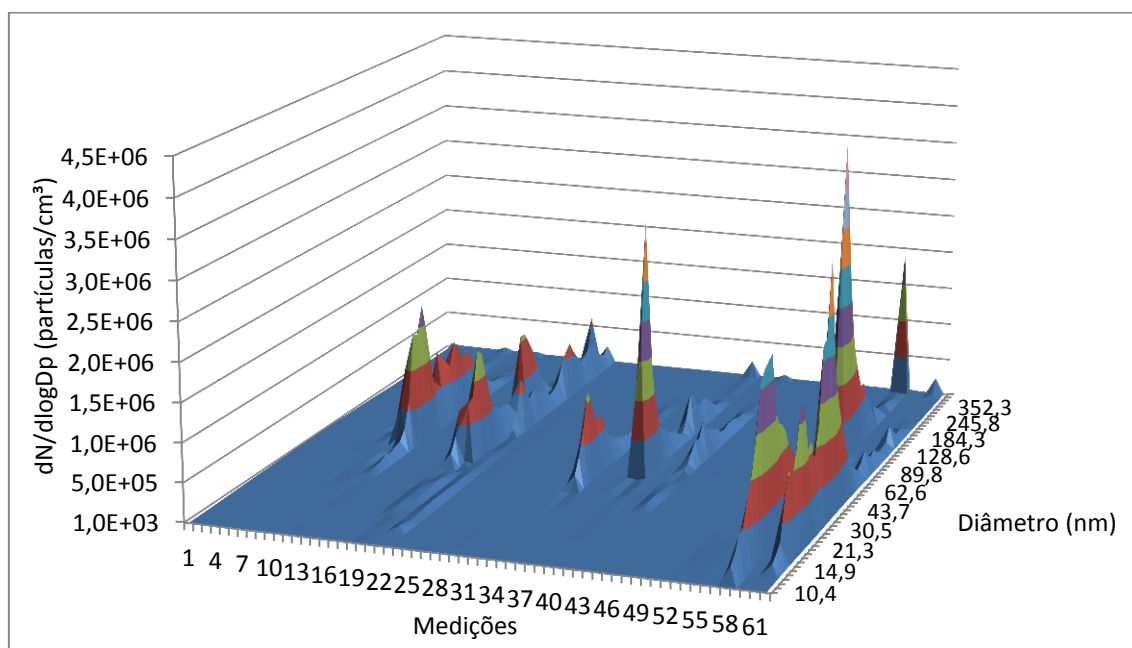


Figura 4.22: Medições do SMPS 3034 ao longo de todos os ensaios.

Na figura 4.23, podem observar-se os resultados referentes ao Caso 1, a soldadura a 450 rev/min. Verifica-se que os valores máximos de contagem, para este caso, se encontram no intervalo compreendido entre 58,3 e 67,3 nm, e que atingiram valores entre $1,34 \times 10^6$

e $1,78 \times 10^6$ partículas. Pode-se também observar a existência de uma gama de valores mais elevados de nanopartículas compreendidos entre os 50,5 e os 184,3 nm.

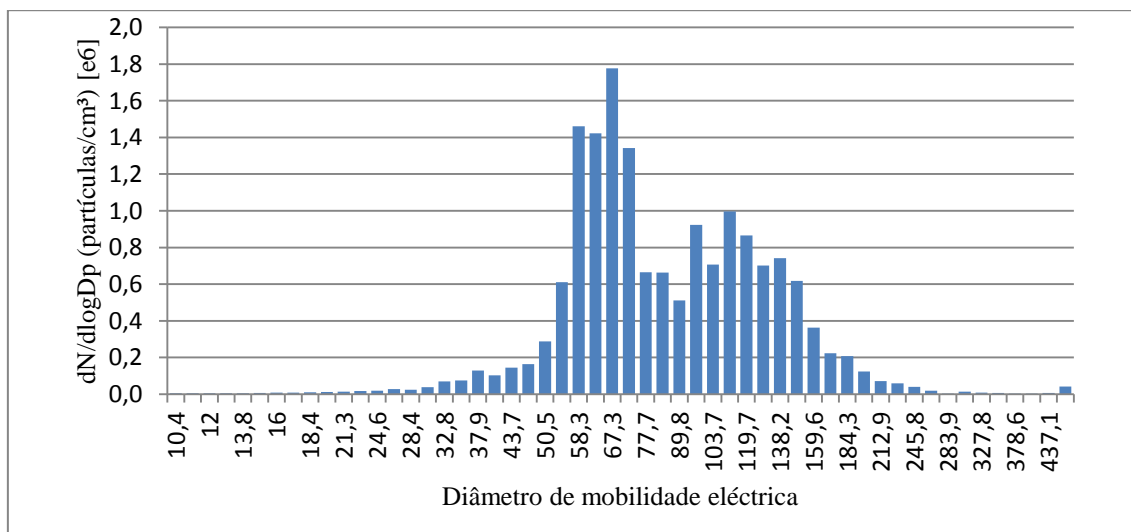


Figura 4.23: SMPS 3034 AA 5083 450 rev/min

Na figura 4.24 podem observar-se os resultados referentes ao Caso 2, uma soldadura a 1120 rev/min. Podem observar-se dois picos distintos na contagem de nanopartículas:

i) um em que os valores máximos se encontram nos pontos referentes a diâmetros de 54,2 nm e 58,3 nm, com valores aproximados de $1,33 \times 10^6$ e, ii) outro pico nos 128,6 e 138,2 nm, com valores de contagem de cerca de $1,07 \times 10^6$ partículas. Os valores de contagem mais elevados foram medidos para valores de diâmetro superiores a 40,7 nm.

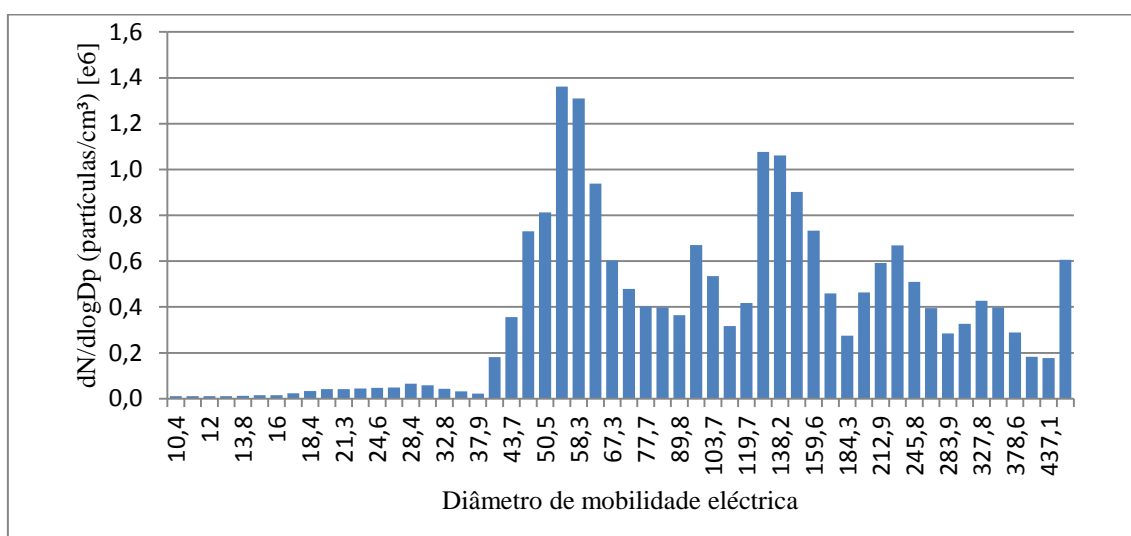


Figura 4.24: SMPS 3034 AA 5083 1120 rev/min

Na figura 4.25, podem observar-se os resultados referentes ao Caso 3, uma soldadura a 800 rev/min. Pode verificar-se que os valores máximos de contagem, para este caso, se encontram no intervalo compreendido entre 50,5 e 58,3 nm e que atingiram valores compreendidos entre $1,77 \times 10^6$ e $3,24 \times 10^6$ partículas. Os valores de contagem mais elevados foram medidos para valores de diâmetro superiores a 37,9 nm.

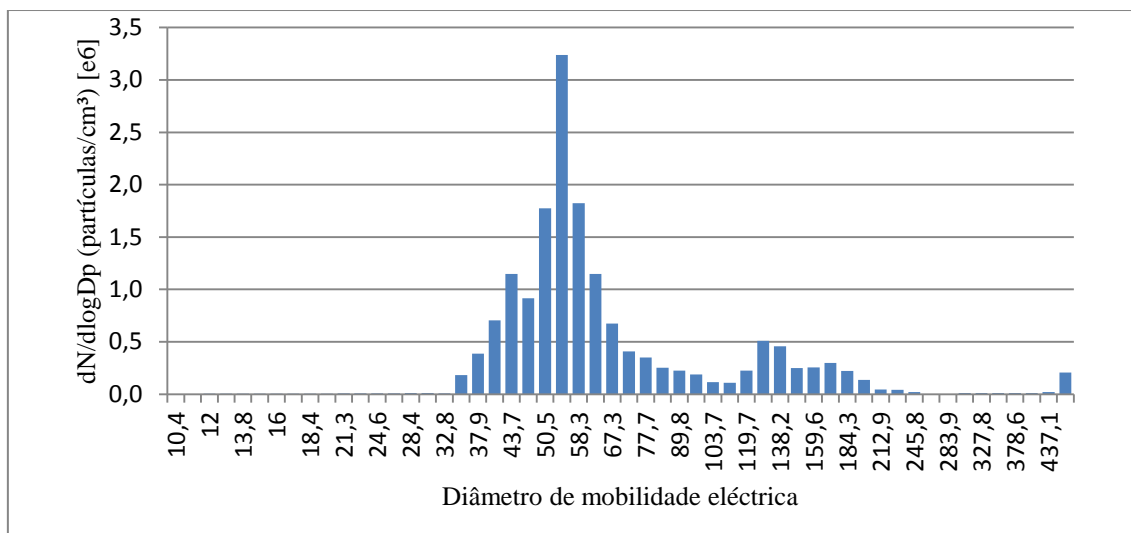


Figura 4.25: SMPS 3034 AA 6082 800 rev/min

Na figura 4.26 podem observar-se os resultados referentes ao Caso 4, uma soldadura a 1120 rev/min. Neste caso, verifica-se a existência de três máximos nas medições para 21,3, 37,9 e 111,4 nm. Observa-se também um número de partículas de dimensões superiores, mais baixo do que nas restantes contagens.

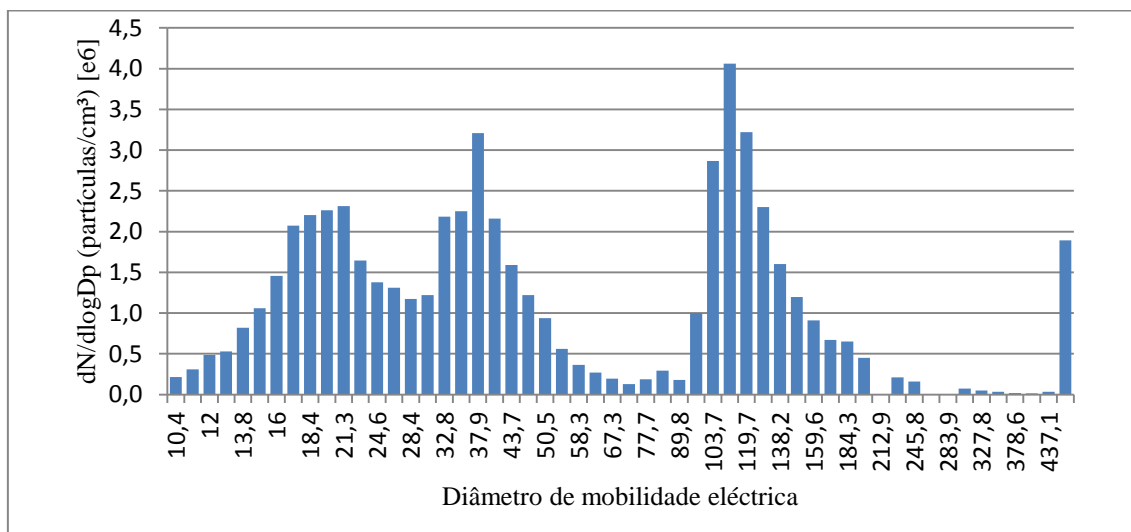


Figura 4.26: SMPS 3034 AA 6082 1120 rev/min

Através da análise de todos os gráficos apresentados pode-se verificar uma tendência para a existência de valores máximos, no número de partículas com um diâmetro compreendido entre 40 e 70 nm. Relacionando estes resultados com a figura 2.12, observa-se que, para os diâmetros medidos existe uma eficiência de deposição compreendida entre os 45 % e 30 %, o que confirma os valores obtidos pelo NSAM 3550.

Na representação gráfica de todos os ensaios existem valores nulos e um valor de contagem para 469,8 nm, superior aos anteriores. Estas ocorrências não se devem a quaisquer actividades ao longo dos ensaios, mas sim a erros sistemáticos, verificados em todas as medições e que têm origem no equipamento utilizado, registado depois pelo *software*. Optou-se por não efectuar qualquer tipo de regressão nestes casos, fazendo-se referência apenas ao erro ocorrido e mantendo as medições registadas pelo *software*.

4.3.3 Resultados de microscopia

Após a recolha de nanopartículas, com o equipamento NAS, foram efectuadas análises microscópicas para caracterização das mesmas. As amostras recolhidas distinguem-se pelo material base onde foi efectuada a soldadura por fricção linear.

Na figura 4.27 podem observar-se as partículas analisadas pelo microscópio electrónico de transmissão, presente no *MicroLab* (ICEM/IST), para a liga de alumínio AA 5083.

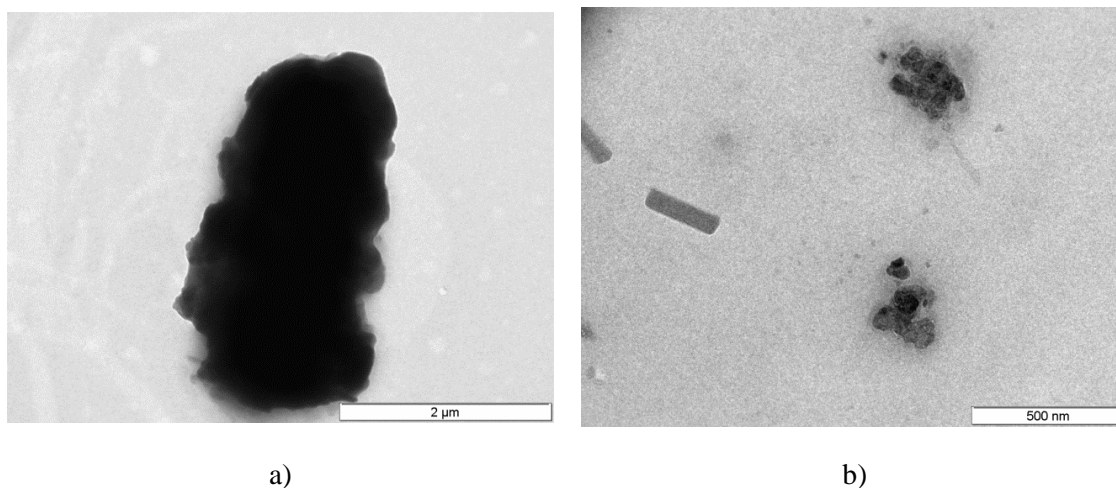


Figura 4.27: Partículas provenientes da soldadura na liga AA 5083, com a) escala de 200 μm e b) 500 nm

Pode observar-se, na figura 4.27 a), uma partícula de dimensões micrométricas com bastantes irregularidades na forma. Nesta figura não é perceptível que esta seja constituída por um aglomerado de partículas nanométricas, sendo mais provável que seja um fragmento da liga de alumínio utilizada. Por sua vez, na figura 4.27 b) podem observar-se dois tipos de morfologias distintas: i) aglomerados de nanopartículas de dimensões aproximadas de 100 nanómetros com

uma geometria aproximadamente circular, mais à direita, e ii) uma partícula singular de forma rectangular, mais à esquerda.

Na figura 4.28 a) pode-se observar um aglomerado de partículas de forma circular, bem como partículas singulares, também de forma circular. Procedeu-se então a uma análise da sua composição química, por EDS, na qual se obteve o espectro apresentado na figura 4.29. Nesta figura podem-se observar picos muito elevados referentes ao cobre, comparativamente aos restantes picos. Estes valores não são considerados relevantes, uma vez que as amostras foram recolhidas em grelhas de cobre, específicas para este tipo de estudos. Observam-se também três picos distintos, referentes ao alumínio, ao silício e ao oxigénio. O alumínio e o silício seriam de esperar e provêm da liga de alumínio utilizada. Em estudos realizados anteriormente, partículas provenientes da soldadura por fricção linear apresentaram composições químicas semelhantes, onde a existência de SiO_2 foi referida [2].

Na figura 4.28 b) pode observar-se um conjunto de partículas circulares aglomeradas, de várias dimensões, entre cerca de 400 e 80 nm. Este aglomerado de partículas foi analisado também por EDS. Na figura 4.29 pode observar-se o espectro obtido.

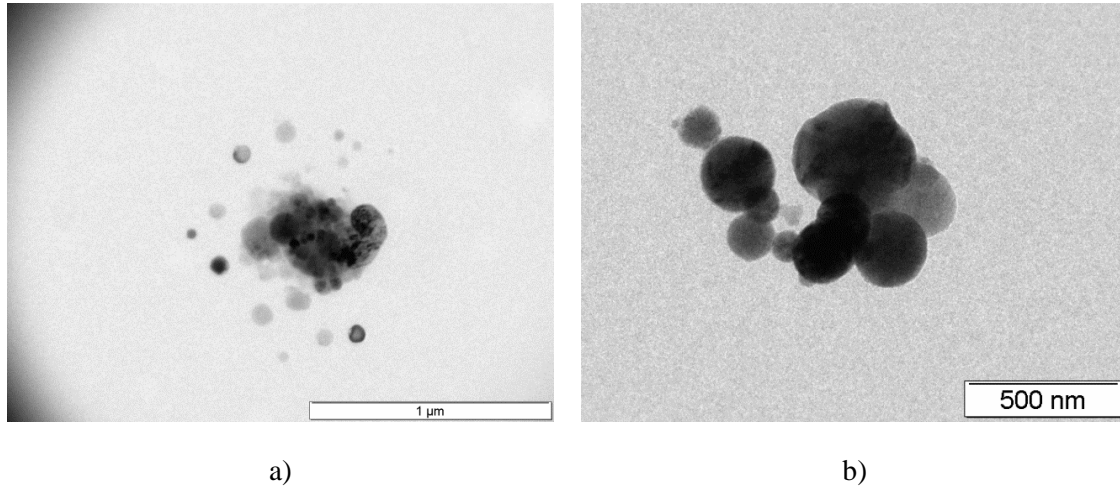


Figura 4.28: Partículas provenientes da soldadura na liga AA 5083, com uma escala de a) 1 µm e b) 500 nm analisadas quimicamente

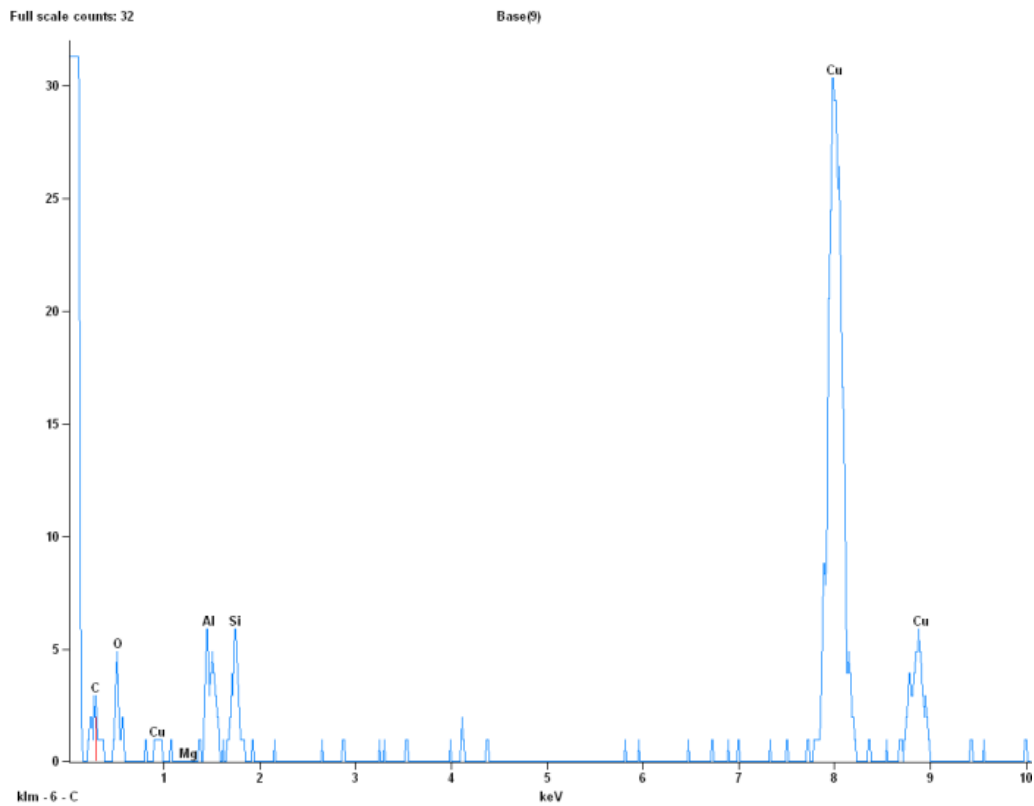


Figura 4.29: Espectro referente às partículas representadas na figura 4.28a)

Observa-se igualmente a existência de valores elevados de cobre, tal como anteriormente, os quais são desprezados devido à constituição do substrato de recolha utilizado. Observa-se a existência de um pico referente ao ferro. Outros resultados análogos foram encontrados noutros estudos, e nenhuma hipótese foi proposta para a existência de partículas esféricas de ferro em partículas recolhidas para a soldadura por fricção linear [2].

Devido à existência de ferro na liga AA 5083, bem como no material da ferramenta, a sua proveniência deve provavelmente ser originada no processo de soldadura.

Não foi possível efectuar uma análise química referente à liga AA 6082, uma vez que a grelha utilizada para efectuar a recolha de partículas desta liga se encontrava deteriorada, e sem a película onde seria de esperar encontrar as nanopartículas.

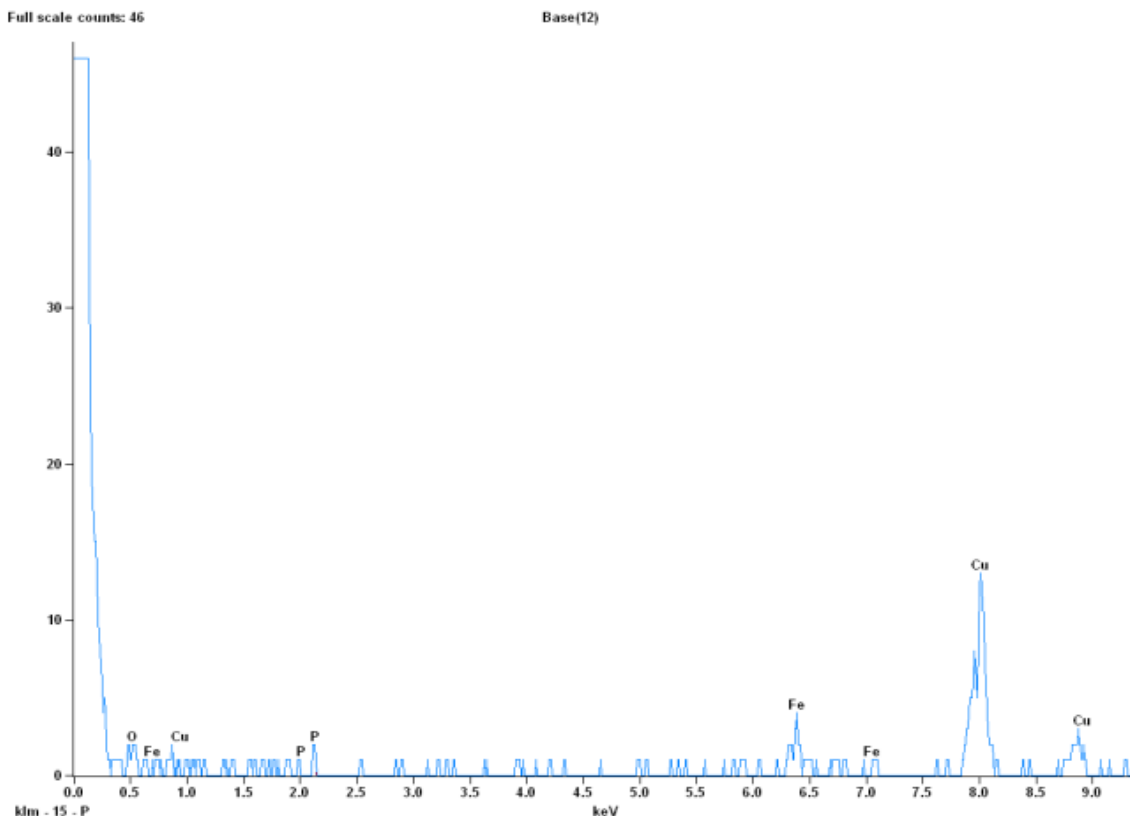


Figura 4.30: Espectro referente às partículas representadas na figura 4.28 b)

Recorrendo ao microscópio FEI-Tecnai, Modelo G2 S20, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica, da FCT-UC foi possível observar as partículas recolhidas de ambas as ligas.

Na figura 4.31 podem observar-se as partículas provenientes da liga AA 5083.

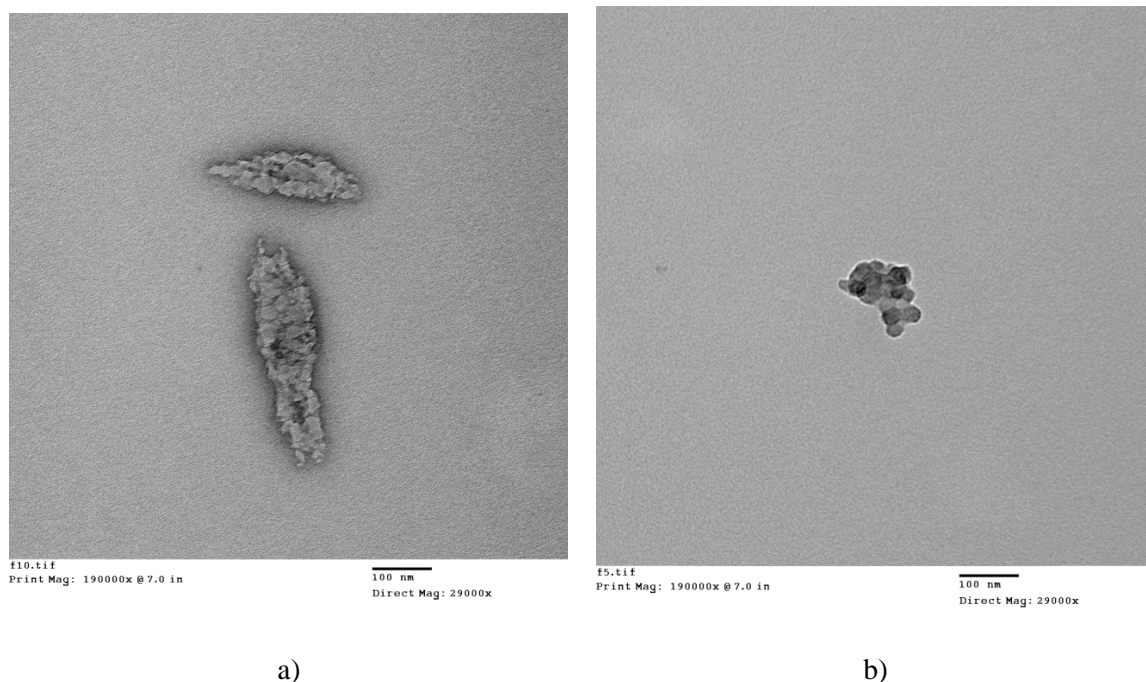


Figura 4.31: Partículas provenientes da soldadura na liga AA 5083, com a) escala de 100 nm e b) 100 nm

Na figura 4.31 a) observam-se duas partículas de formas semelhantes, com bastantes irregularidades na sua forma. Contudo, não é perceptível que esta seja constituída por um aglomerado de partículas nanométricas, sendo mais provável que seja uma única partícula proveniente da liga de alumínio utilizada. Estas partículas apresentam semelhanças com partícula observada na figura 4.27 a), apesar de apresentarem dimensões inferiores.

Na figura 4.31 b) pode observar-se um aglomerado de nanopartículas com uma dimensão máxima de cerca de 200 nm. As nanopartículas que o constituem apresentam dimensões de cerca de 30 nm e apresentam formas arredondadas.

Na figura 4.32, podem observar-se partículas recolhidas durante a soldadura da liga AA6082, obtidas com o microscópio FEI-Tecnai, modelo G2 S20.

Na figura 4.32 a) pode observar-se uma partícula de dimensões de cerca de 200 nm, com uma forma amorfa, não sendo possível concluir se esta é um aglomerado de partículas ou uma partícula única.

Na figura 4.32 a) podem observar-se várias partículas, de dimensões variadas. Todas estas partículas apresentam formas bastantes diferentes e amorfas, não sendo possível verificar se as partículas de dimensões superiores são singulares ou aglomerados. As partículas de dimensões inferiores aparentam ser partículas singulares.

A forma das partículas recolhidas, para esta liga de alumínio diferem bastante das obtidas para a liga AA 5083. As partículas da liga AA 5083 são partículas mais definidas e de forma

arredondada. Contudo, encontraram-se também partículas de dimensões superiores, em ambas as amostras analisadas, para a liga AA 5083, sendo estas provavelmente provenientes da liga de alumínio utilizada.

Nas amostras recolhidas para a soldadura da liga AA 6082, verifica-se uma presença maior de partículas singulares, comparativamente com a liga AA 5083, ou seja as partículas parecem ter uma menor tendência para formar agregados.

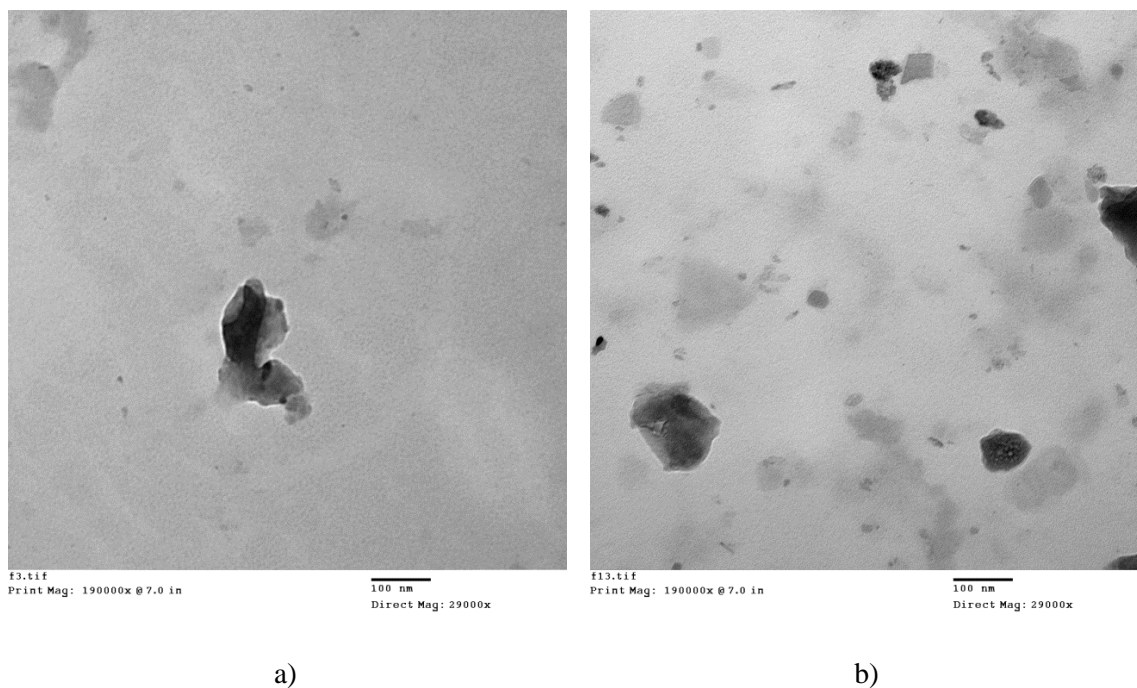


Figura 4.32: Partículas provenientes da soldadura na liga AA6082, com uma escala de a) 1 nm e b) 100 nm

5. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu concluir que existem emissões de partículas de dimensões nanométricas directamente originadas pelo processo de soldadura por fricção linear.

Estas emissões contêm partículas com capacidade de deposição alveolar. Na primeira fase de ensaios foi possível identificar variações significativas na área superficial das partículas por volume pulmonar, em qualquer uma das ligas utilizadas, para diferentes pontos de recolha, nomeadamente:

- no ponto de recolha mais afastado, considerado como uma medição da envolvente, os valores obtidos são, para qualquer um dos casos em estudo, próximos dos medidos sem a realização da soldadura por fricção linear;
- no ponto considerado como a zona respiratória do operador, os valores apresentados são ligeiramente superiores aos da envolvente, notando-se apenas valores médios consideravelmente superiores para a soldadura realizada na liga AA 6082 a 1120 rev/min;
- no ponto considerado como medição na ferramenta, os valores obtidos são, no mínimo, mais de 2200 vezes superiores aos medidos para a envolvente, e mais de 14,5 vezes superiores às registadas na zona respiratória do operador.

Pode afirmar-se que a distância ao local de soldadura é um factor muito relevante para uma diminuição da área de superfície das partículas por volume pulmonar.

Na primeira fase de ensaios foi também possível observar, no ponto mais próximo da ferramenta, a inexistência de diferenças consideráveis entre os valores médios de área de superfície por volume pulmonar entre as ligas utilizadas, assim como de diferenças nos valores medidos com a variação dos parâmetros de soldadura. Assim, não foi possível nestes ensaios tirar conclusões sobre a relação entre parâmetros ou ligas utilizadas, com as emissões de partículas com capacidade de deposição alveolar.

A metodologia adoptada na primeira fase de ensaios permitiu avaliar as variações de área de superfície das partículas na zona alveolar com a distância à soldadura. Uma vez que a soldadura foi realizada numa fresadora sem controlo da força vertical, e com a necessidade de correcções manuais da penetração da ferramenta, as medições efectuadas não apresentam perfis consistentes entre cada soldadura, nem valores necessariamente coerentes.

Assim, efectuaram-se ensaios numa segunda fase referentes ao ponto mais próximo, utilizando um equipamento de soldadura disponível no IST que permite um maior controlo do processo. Das medições efectuadas foi possível concluir que:

- velocidades superiores de rotação, para a mesma velocidade de avanço, originam valores superiores de área de superfície das partículas por volume pulmonar. Este facto foi verificado para ambas as ligas, e o mesmo pode ser explicado pelo aumento do atrito por fricção e consequente aumento de temperatura durante o processo;
- a liga AA 5083 apresenta valores médios duas vezes superiores aos medidos na liga AA 6082-T6, comprovando-se, assim, que o material a soldar influencia os valores de área de superfície das partículas, por volume pulmonar;
- nas soldaduras efectuadas com menor velocidade de rotação, o perfil obtido apresenta um comportamento semelhante: inicialmente crescente, estabilizando depois numa gama de valores específicos. Dado o limitado numero de ensaios, não foi possível avaliar concretamente esta tendência, julgando-se que tal possa ocorrer para valores de velocidade de rotação superiores. Ensaio mais longos poderiam fornecer informação relevante neste aspecto, permitindo obter, assim, a gama de valores de área de superfície para a velocidade de rotação utilizada para cada liga.

Através das medições realizadas com o equipamento SMPS 3034 foi possível concluir que:

- as partículas medidas são originadas no processo de soldadura por fricção linear e têm, dimensões nanométricas;
- para soldaduras com a duração de 105 s, e através do equipamento de medição utilizado, não foi possível verificar de forma gradual a diminuição da quantidade de partículas presentes no ar;
- as dimensões mais comuns de partículas libertadas encontram-se entre 40 e 70 nm, com excepção para a soldadura a 1120 rev/min da liga AA 6082-T6, mas a existência de variações consideráveis não permite retirar conclusões mais detalhadas a respeito do quantitativo de partículas e dos seus tamanhos;
- a metodologia utilizada poderá resultar na obtenção de valores de medições algo diferentes das esperadas. No tratamento e apresentação dos dados a abordagem adoptada teve como objectivo a redução de possíveis erros de medição, mas para a realização de trabalhos futuros aconselha-se a utilização de equipamentos com tempos de recolha superiores, ou a realização de soldaduras com o mínimo de 180 segundos de duração.

Relativamente á análise microscópica efectuada, pode concluir-se que:

- as partículas libertadas têm na sua composição química, os elementos químicos do material base.
- existem partículas com quantidades elevadas de ferro, que podem ter origem no desgaste da ferramenta;
- as partículas provenientes da liga AA 5083 têm na sua maioria, formas esféricas, o que sugere a fusão dos materiais, na zona em contacto com a ferramenta.
- existem aglomerados de partículas de dimensões esféricas, o que pode sugerir que se atingiu o ponto de fusão do material na soldadura por fricção linear, contudo isto requer uma análise da estrutura cristalina das partículas.
- observaram-se partículas de dimensões superiores sem formas definidas que aparentam ser fragmentos da liga de alumínio utilizada.

Em trabalhos futuros seria relevante:

- caracterizar as emissões de nanopartículas em ambiente industrial, para avaliar a quantidade de partículas que permanece em suspensão ao longo de um período de trabalho mais prolongado;
- realizar um maior número de recolhas de nanopartículas para análise morfológica e química;
- realizar soldaduras mais longas, com diferentes parâmetros operacionais, de modo a verificar a existência de um valor limite de referência para os valores de área de superfície de partículas, depositadas na zona alveolar.
- avaliar a importância da variação de geometrias do *shoulder* e do pino nas emissões de nanopartículas, e monitorizar a temperatura atingida de modo a relacioná-la com as emissões geradas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science & Engineering R-Reports*, vol. 50, pp. 1-78, Aug 31 2005.
- [2] F. E. Pfefferkorn, D. Bello, G. Haddad, J. Y. Park, M. Powell, J. McCarthy, *et al.*, "Characterization of Exposures to Airborne Nanoscale Particles During Friction Stir Welding of Aluminum," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, pp. 486-503, Jul 2010.
- [3] J. F. Gomes, P. C. Albuquerque, R. M. Miranda, and M. T. Vieira, "Determination of airborne nanoparticles from welding processes," presented at the International Conference on Occupational Environmental Health, 2011.
- [4] K. Elihn, P. Berg, and G. Liden, "Correlation between airborne particle concentrations in seven industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition," *Journal of Aerosol Science*, vol. 42, pp. 127-141, Feb 2011.
- [5] A. D. Althouse, C. H. Turnquist, W. A. Bowditch, K. E. Bowditch, and M. A. Bowditch, *Modern Welding*. Illinois: The Goodheart-Willcox Company, Inc., 2004.
- [6] J. F. O. Santos and L. Quintino, *Processos de Soldadura*: ISQ, 1999.
- [7] R. Nandan, T. DebRoy, and H. K. D. H. Bhadeshia, "Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties," *Progress in Materials Science*, vol. 53, pp. 980-1023, Aug 2008.
- [8] W. M. Thomas, K. I. Johnson, and C. S. Wiesner, "Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies," *Advanced Engineering Materials*, vol. 5, Jul 2003.
- [9] Y. S. Sato, M. Urata, and H. Kokawa, "Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063," *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 33, Mar 2002.
- [10] S. Escala, M. Nooij, and L. Quintino, "Economically Welding in a Healthy Way," presented at the 1st IIW South - East European Welding Congress, 2006.
- [11] N. Group. (2009). *Good Safety and Health in Workshops is Good Business*. Disponível em: http://www.acs-cal.com/PDF/Welding_health%20pdf.ashx_1.pdf
- [12] (12 de Fevereiro de 2012). Disponível em: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/index.htm>
- [13] L. Quintino, B. Hourmat, and I. Pires, "Health and Safety in Welding in the European Union," presented at the XXXV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Piracicaba, SP, Brasil, 2009.
- [14] I. Pires, L. Quintino, R. Miranda, and J. Gomes, "Fume emissions during gas metal arc welding," *Toxicological & Environmental Chemistry*, vol. 88(3), pp. 385–394, 2006.

- [15] L. Matos, P. Santos, and F. Barbosa, "As Nanopartículas em Ambientes Ocupacionais," *Revista Segurança*, vol. 202, pp. 10-14, 2011.
- [16] D. Brouwer, M. Berges, M. A. Virji, W. Fransman, D. Bello, L. Hodson, *et al.*, "Harmonization of Measurement Strategies for Exposure to Manufactured Nano-Objects; Report of a Workshop," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 56, pp. 1-9, Jan 2012.
- [17] ESAB, "LEGIO FSW 3U Friction Stir Welding Machine ", ed, 2007.
- [18] T.S.I. (6 de Agosto de 2012). *Nanoparticle Surface Area Monitor 3550*. Disponível em: <http://www.tsi.com/ProductView.aspx?id=21931>
- [19] T.S.I. (6 de Agosto de 2012). *Nanometer Aerosol Sampler Model 3089*. Disponível em: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3089.pdf
- [20] T.S.I. (2003). *Model 3034, SMPSTM Scanning Mobility Particle Sizer. Operation and Service Manual*. Disponível em: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3089.pdf
- [21] (10 de Agosto de 2012). *Rede Nacional de Microscopia*. Disponível em: http://rnme.up.pt/index_3_pt.htm
- [22] I. N. A. Oguocha, O. J. Adigun, and S. Yannacopoulos, "Effect of sensitization heat treatment on properties of Al-Mg alloy AA5083-H116," *Journal of Materials Science*, vol. 43, pp. 4208-4214, Jun 2008.
- [23] (Dezembro de 2011). *Aluminum 6082 - T6*. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7>
- [24] (Dezembro de 2011). *Aluminum 5083-O*. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d105c2a24d6942cdad79259f770fb806>
- [25] (Junho de 2012). *AISI Type H13 Hot Work Tool Steel*. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7>

ANEXOS

A1 - Valores das medições da primeira fase de ensaios para a liga AA 6082-T6

Tabela A 1: Ferramenta 1120 rev/min

Ferramenta 1120 rev/min			Linha de base	Sem valores linha de base		
Sample	5	6	4	5	6	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	57	76,64	61,31	0,00	17,72	0,00
20	3585,68	4075,4	61,21	3526,76	4016,48	3771,62
30	16994,5	10580,9	60,25	16935,58	10521,98	13728,78
40	19208,5	10852,1	59,72	19149,58	10793,18	14971,38
50	20173,8	4383,8	59,66	20114,88	4324,88	12219,88
60	12747,6	4739,7	59,33	12688,68	4680,78	8684,73
70	13501,8	4409,3	58,97	13442,88	4350,38	8896,63
80	6865,8	6026,5	57,96	6806,88	5967,58	6387,23
90	488,2	1735,2	57,79	429,28	1676,28	1052,78
100	150,9	477,9	57,83	91,98	418,98	255,48
110	103,95	178,9	57,42	45,03	119,98	82,50
120	98	87,77	57,12	39,08	28,85	33,96
130	100,13	70,82	57,42	41,21	11,90	26,55
Linha base				Valor médio		5393,19
Média		58,92				
Desvio Padrão		1,39				

Tabela A 2: Ferramenta 450 rev/min

			Linha de base			Sem valores da linha de base		
Amostra	2	3	1			2	3	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg (µm²/cm³)							
10	58,95	2598,92	42,05	48,51	46,5	13,66	2553,63	1283,65
20	58,19	13380,9	40,47	47,62	45,8	12,90	13335,61	6674,26
30	1577,51	13663,4	43,64	51,69	48,1	1532,22	13618,11	7575,17
40	23624,7	13167,7	42,47	52,36	49,4	23579,41	13122,41	18350,91
50	21016,1	3511,9	42,9	47,11	42,33	20970,81	3466,61	12218,71
60	15094,1	8827,6	41,43	43,19	41,79	15048,81	8782,31	11915,56
70	9089	2695,9	41,53	45,18	44,27	9043,71	2650,61	5847,16
80	8069,9	179,6	40,5	48,68	44,03	8024,61	134,31	4079,46
90	2859,9	99,5	39,58	41,31	41,37	2814,61	54,21	1434,41
100	230,1	78,05	39,62	48,29	43,82	184,81	32,76	108,79
110	131,3	72,89	40,41	44,64	46,12	86,01	27,60	56,81
120	83,85	67,75	42,26	48,44	41,56	38,56	22,46	30,51
130	74,97	72,48	43,34	48,58	39,58	29,68	27,19	28,44
	Linha base		45,26	46,32	39,06	Valor médio		5354,14
	Média	45,29	45,69	46,77	45,11			
	Desvio Padrão	3,18	42,61	51,75	51,54			
			52,86	53,74	55,85			
			47,84					

Tabela A 3: Zona respiratória 1120 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	15	16	14	15	16	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	51,8	51,15	51,95	1,05	0,40	0,73
20	315,13	50,11	51,47	264,38	0,00	0,00
30	121,17	48,52	51,89	70,42	0,00	0,00
40	558,3	656,94	51,9	507,55	606,19	556,87
50	3279,5	50,87	52,38	3228,75	0,12	1614,44
60	4816,8	100,3	52,66	4766,05	49,55	2407,80
70	51,59	50,7	51,58	0,84	0,00	0,00
80	204,03	50,52	49,21	153,28	0,00	0,00
90	196,42	50,55	48,1	145,67	0,00	0,00
100	97,78	57,64	48,41	47,03	6,89	26,96
110	54,22	51,09	49,11	3,47	0,34	1,91
120	54,48	54,95	49,95	3,73	4,20	3,97
130	57,18	55,27	51,1	6,43	4,52	5,48
Linha base				Valor médio		355,24
Média		50,75				
Desvio Padrão		1,52				

Tabela A 4: Zona respiratória 450 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	18	19	17	18	19	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	51,37	61,24	55,75	0,00	6,51	0,00
20	51,71	58,01	55,98	0,00	3,28	0,00
30	58,62	57,78	55,06	3,89	3,05	3,47
40	63,57	56,39	60,12	8,84	1,66	5,25
50	61,16	56,77	61,34	6,43	2,04	4,23
60	61,51	61,76	58,79	6,78	7,03	6,90
70	225,48	88,22	58,58	170,75	33,49	102,12
80	113,43	84,44	53,31	58,70	29,71	44,20
90	76,27	94,84	51,39	21,54	40,11	30,82
100	60,16	86,69	50,57	5,43	31,96	18,69
110	58,45	983,84	51,07	3,72	929,11	466,41
120	57,33	61,65	50,02	2,60	6,92	4,76
130	59,76	61,19	49,57	5,03	6,46	5,74
Linha base				Valor médio		53,27
Média		54,73				
Desvio Padrão		3,92				

Tabela A 5: Envolvente 1120 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	12	13	11	12	13	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	47,33	51,29	49,94	0,00	1,37	0,00
20	46,58	50,43	51,44	0,00	0,51	0,00
30	47,32	50,41	51,46	0,00	0,49	0,00
40	47,6	50,61	49,44	0,00	0,69	0,00
50	47,68	50,24	49,82	0,00	0,32	0,00
60	50,34	51,06	48,73	0,42	1,14	0,78
70	49,11	51,41	49,31	0,00	1,49	0,00
80	49,43	64,13	49,76	0,00	14,21	0,00
90	48,74	51,04	51,04	0,00	1,12	0,00
100	47,73	50,42	49,94	0,00	0,50	0,00
110	51,71	53,08	50,19	1,79	3,16	2,47
120	49,41	53,2	49,58	0,00	3,28	0,00
130	48,92	53,19	48,37	0,00	3,27	0,00
Linha base			Valor médio			0,25
Média		49,92				
Desvio Padrão		0,90				

Tabela A 6: Envolvente 450 rev/min

			Linha de base	Sem valores da linha de base		
Sample	8	9	7	8	9	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	58,54	54,48	65,63	0,00	0,00	0,00
20	56,19	53,57	70,68	0,00	0,00	0,00
30	54,18	55,4	74,75	0,00	0,00	0,00
40	56,94	56,31	80,82	0,00	0,00	0,00
50	55,92	55,32	76,87	0,00	0,00	0,00
60	56,28	61,77	79,34	0,00	0,00	0,00
70	57,84	88,31	74,54	0,00	9,68	0,00
80	61,96	85,64	83,64	0,00	7,01	0,00
90	61,56	56,33	90,22	0,00	0,00	0,00
100	58,38	58,42	78,58	0,00	0,00	0,00
110	57,64	57,93	80,37	0,00	0,00	0,00
120	57,04	55,79	82,88	0,00	0,00	0,00
130	56,64	57,52	83,84	0,00	0,00	0,00
Linha base			Valor médio			0,00
Média		78,63				
Desvio Padrão		6,08				

A2 - Valores das medições da primeira fase de ensaios para a liga AA 5083-O

Tabela A 7: Ferramenta 1120 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	5	6	4	5	6	Média s\base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	58,83	71,98	67,02	0,00	9,00	0,00
20	59,2	2073,87	63,88	0,00	2010,89	0,00
30	904,65	9264,5	64,66	841,67	9201,52	5021,60
40	6503,8	9950,5	62,49	6440,82	9887,52	8164,17
50	9172,4	11723,1	61,22	9109,42	11660,12	10384,77
60	12692,9	13083,8	63,52	12629,92	13020,82	12825,37
70	9559,3	10976,6	61,1	9496,32	10913,62	10204,97
80	10020,7	7922,8	60,82	9957,72	7859,82	8908,77
90	6901,6	3583,1	61,45	6838,62	3520,12	5179,37
100	968,8	1471,5	63,21	905,82	1408,52	1157,17
110	263	131,86	63,51	200,02	68,88	134,45
120	81,05	71,38	62,83	18,07	8,40	13,24
Linha de base			Valor médio			5166,16
Média						62,98
Desvio Padrão						1,70

Tabela A 8: Ferramenta 450 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
	2	3	1	2	3	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	57,27		63,46	0,00	0,00	0,00
20	57,91		69,16	0,00	0,00	0,00
30	58,85		66,08	0,00	0,00	0,00
40	59,12	63,76	65,84	0,00	0,00	0,00
50	4788,70	61,97	67,00	4722,52	0,00	0,00
60	17315,00	3843,70	67,35	17248,82	3777,52	10513,17
70	11621,30	10262,00	65,52	11555,12	10195,82	10875,47
80	3560,60	6108,10	65,35	3494,42	6041,92	4768,17
90	191,49	7152,00	64,30	125,31	7085,82	3605,56
100	10396,40	10130,00	63,83	10330,22	10063,82	10197,02
110	14065,40	14897,40	63,17	13999,22	14831,22	14415,22
120	20662,60	5876,60	61,32	20596,42	5810,42	13203,42
130	33620,10	158,30	62,42	33553,92	92,12	16823,02
140	20964,30	85,69	66,82	20898,12	19,51	10458,81
150	496,90	71,45	65,50	430,72	5,27	217,99
160	109,65		73,80	43,47	0,00	0,00
170	91,42		67,72	25,24	0,00	0,00
180	75,06		72,61	8,88	0,00	0,00
Linha de base			Valor médio			5282,10
Média		66,18				
Desvio Padrão		3,15				

Tabela A 9: Zona respiratória 1120 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	18	19	17	18	19	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg (µm²/cm³)					
10	73,48	71,15	76,23	0,00	0,00	0,00
20	73,13	117,1	75,45	0,00	42,45	0,00
30	80,99	128,64	75,09	6,34	53,99	30,17
40	72,71	72,82	75,27	0,00	0,00	0,00
50	79,51	89,66	73,67	4,86	15,01	9,94
60	73,38	73,18	75	0,00	0,00	0,00
70	70,77	73,44	74,24	0,00	0,00	0,00
80	73,29	71,07	72,81	0,00	0,00	0,00
90	72,26	70,77	71,85	0,00	0,00	0,00
100	70,98	70,28	74,65	0,00	0,00	0,00
110	70,46	72,91	75,27	0,00	0,00	0,00
120	72,27	76,71	76,25	0,00	2,06	0,00
	Linha de base			Valor médio		3,34
	Média	74,65				
	Desvio Padrão	1,26				

Tabela A 10: Zona respiratória 450 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	15	16	14	15	16	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg (µm²/cm³)					
10	66,17	73,29	74,07	0,00	1,69	0,00
20	66,77	74,75	74,08	0,00	3,15	0,00
30	68,18	75,23	78,15	0,00	3,63	0,00
40	70,1	77,11	74,83	0,00	5,51	0,00
50	76,1	77,43	72,45	4,50	5,83	5,17
60	78,08	78,12	72,39	6,48	6,52	6,50
70	105,28	83,75	70,19	33,68	12,15	22,92
80	78,55	76,82	67,78	6,95	5,22	6,09
90	82,3	76,41	68,87	10,70	4,81	7,76
100	73,76	75,92	70,65	2,16	4,32	3,24
110	74,08	76,71	69,14	2,48	5,11	3,80
120	77,69	76,49	66,57	6,09	4,89	5,49
	Linha de base			Valor médio		5,08
	Média	71,60				
	Desvio Padrão	3,20				

Tabela A 11: Envolvente 1120 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
Sample	9	10	7	9	10	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	70,09	69,42	67,71	4,25	3,58	3,91
20	68,12	66,86	66,69	2,28	1,02	1,65
30	66,84	65,43	65,2	1,00	0,00	0,00
40	70,11	64,83	64,4	4,27	0,00	0,00
50	71,97	65,26	65,41	6,13	0,00	0,00
60	69,12	65,82	65,02	3,28	0,00	0,00
70	66,91	66,73	64,22	1,07	0,89	0,98
80	67,78	70,91	64,52	1,94	5,07	3,50
90	68,56	72,09	66,65	2,72	6,25	4,48
100	69,81	76,88	67,41	3,97	11,04	7,50
110	70,78	67,68	66,09	4,94	1,84	3,39
120	70,33	66,51	66,82	4,49	0,67	2,58
Linha de base				Valor médio		2,33
Média		65,85				
Desvio Padrão		1,16				

Tabela A 12: Envolvente 450 rev/min

			Linha de base	Sem valores de base		
	2	3	1	2	3	Média s\ base
Elapsed [s]	Running Avg ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)					
10	57,27		63,46	0,00	0,00	0,00
20	57,91		69,16	0,00	0,00	0,00
30	58,85		66,08	0,00	0,00	0,00
40	59,12	63,76	65,84	0,00	0,00	0,00
50	4788,70	61,97	67,00	4722,52	0,00	0,00
60	17315,00	3843,70	67,35	17248,82	3777,52	10513,17
70	11621,30	10262,00	65,52	11555,12	10195,82	10875,47
80	3560,60	6108,10	65,35	3494,42	6041,92	4768,17
90	191,49	7152,00	64,30	125,31	7085,82	3605,56
100	10396,40	10130,00	63,83	10330,22	10063,82	10197,02
110	14065,40	14897,40	63,17	13999,22	14831,22	14415,22
120	20662,60	5876,60	61,32	20596,42	5810,42	13203,42
130	33620,10	158,30	62,42	33553,92	92,12	16823,02
140	20964,30	85,69	66,82	20898,12	19,51	10458,81
150	496,90	71,45	65,50	430,72	5,27	217,99
160	109,65		73,80	43,47	0,00	0,00
170	91,42		67,72	25,24	0,00	0,00
180	75,06		72,61	8,88	0,00	0,00
Linha de base				Valor médio		5282,10
Média		66,18				
Desvio Padrão		3,15				

A3 - Gráficos NSAM referentes à liga AA6082-T6, com ensaios, réplicas e linha base

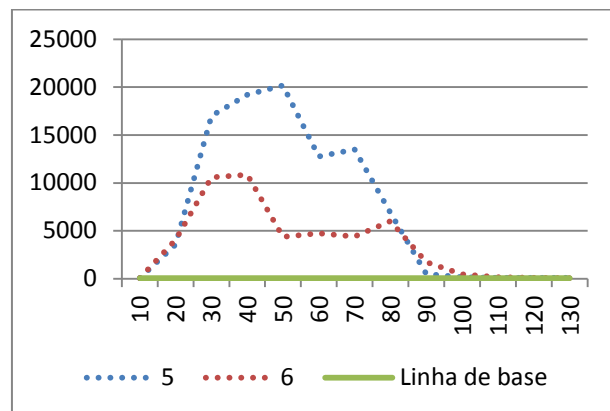


Figura A 1: Ferramenta 1120 rev/min

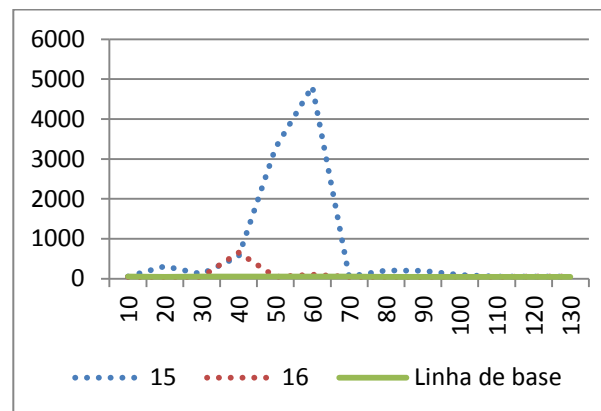


Figura A 2: BZ 1120 rev/min

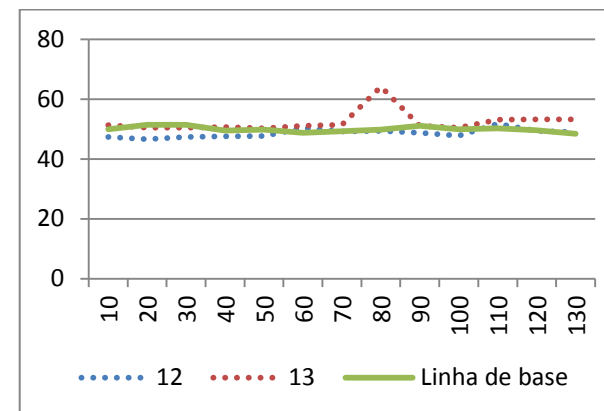


Figura A 3: Envolvente 1120 rev/min

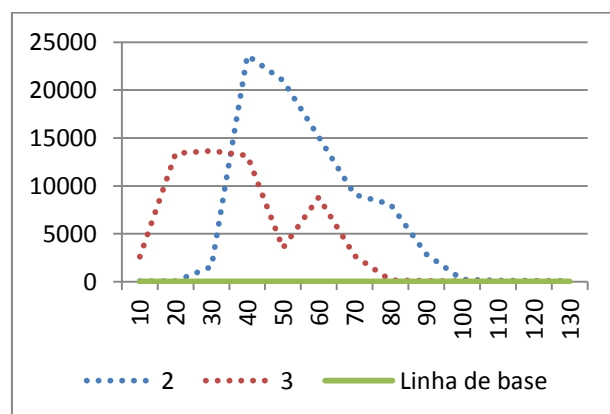


Figura A 4: Ferramenta 450 rev/min

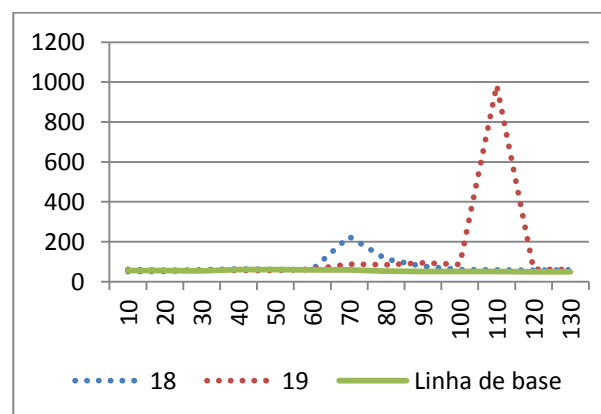


Figura A 5: Zona respiratória 450 rev/min

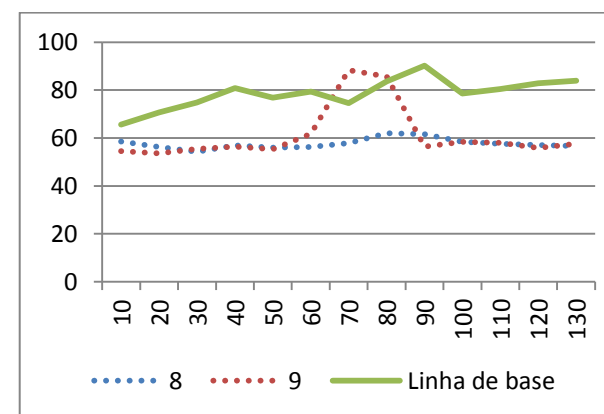


Figura A 6: Envolvente 450 rev/min

A3 - Gráficos NSAM referentes à liga AA5083-O, com ensaios, réplicas e linha base

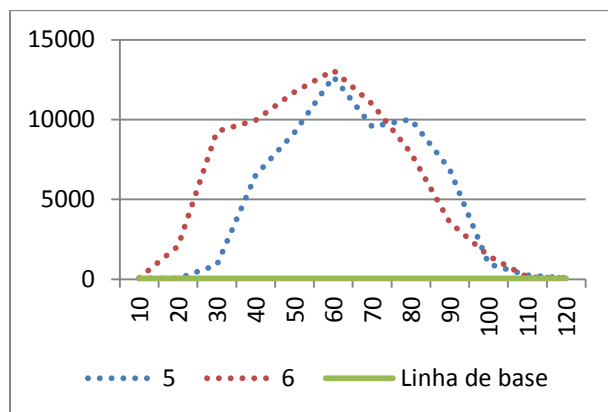


Figura A 7: Ferramenta 1120 rev/min

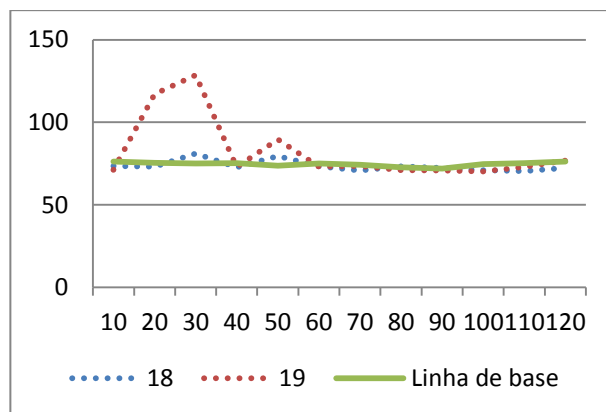


Figura A 8: BZ 1120 rev/min

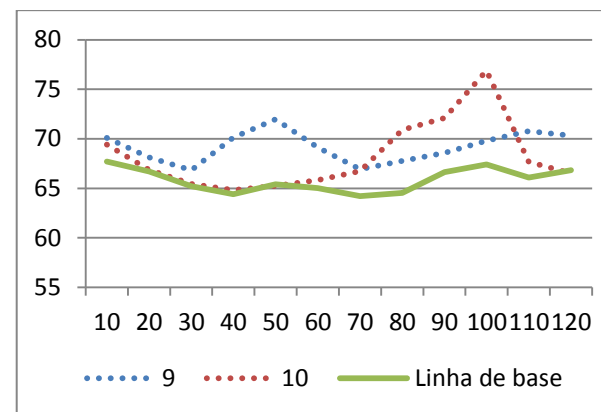


Figura A 9: Envoltive 1120 rev/min

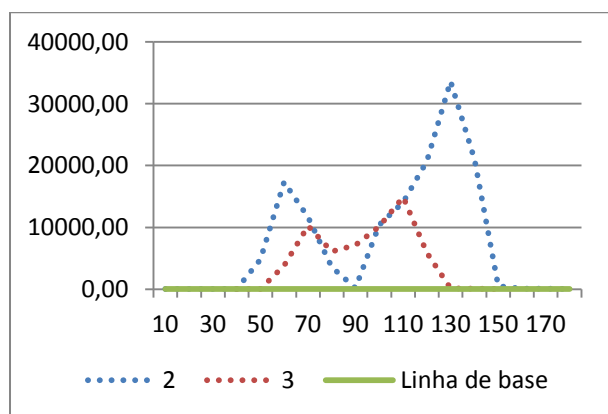


Figura A 10: Ferramenta 450 rev/min

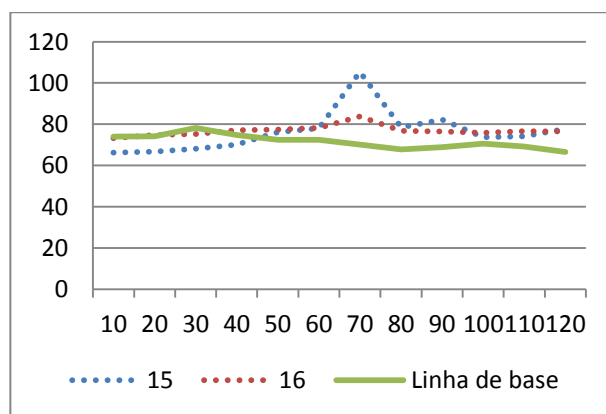


Figura A 11: Zona respiratória 450 rev/min

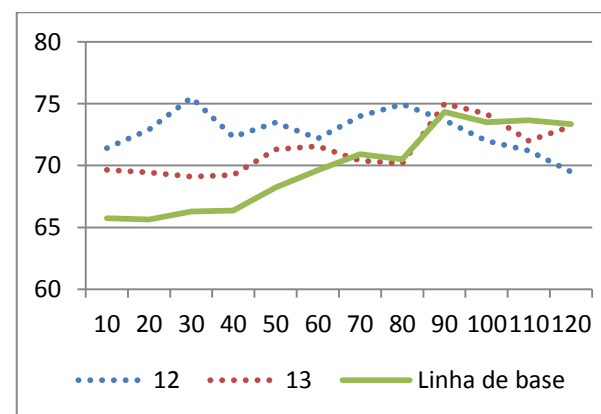


Figura A 12: Envoltive 450 rev/min

